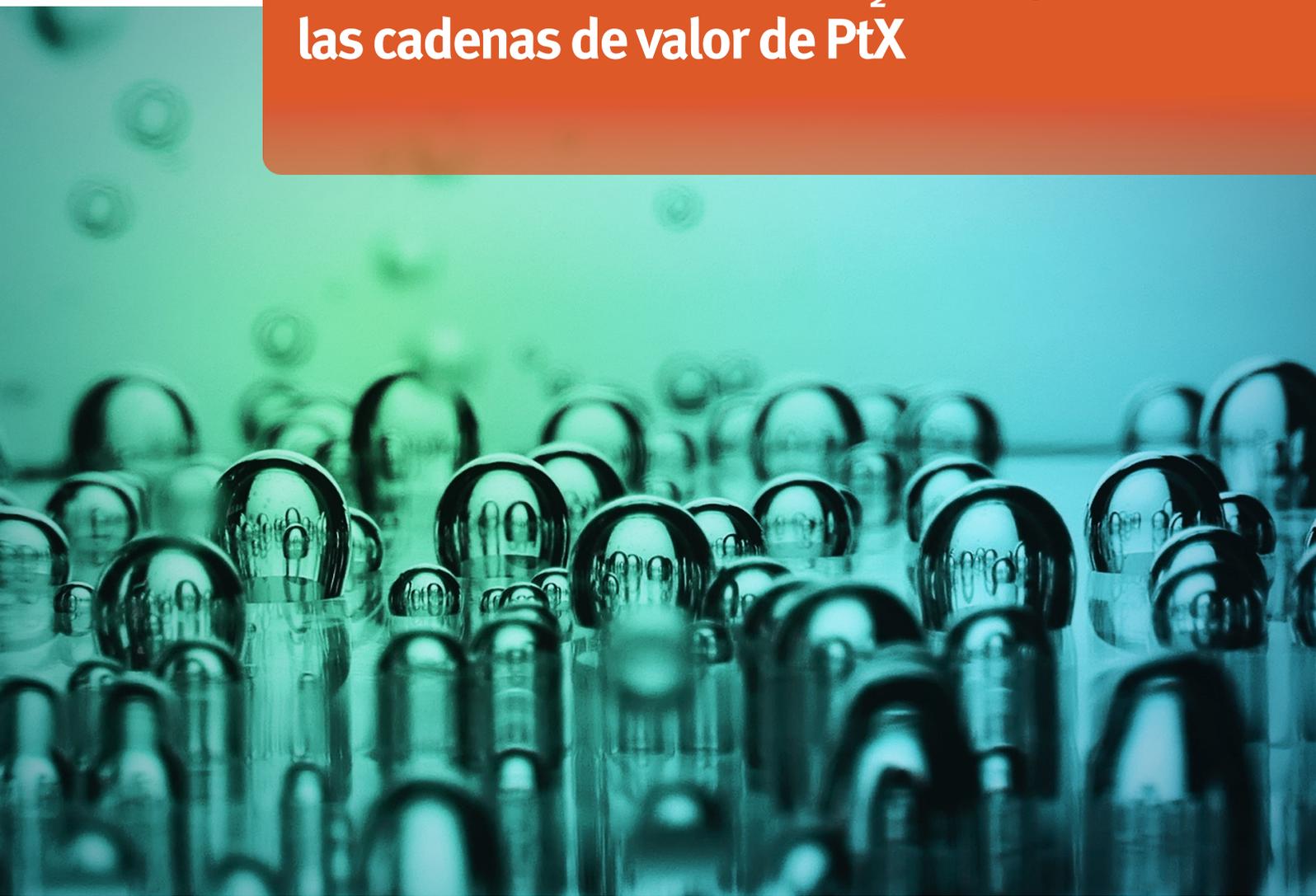


Informe

Carbono para Power-to-X

Fuentes adecuadas de CO₂ e integración en las cadenas de valor de PtX



PIE DE IMPRENTA

Autores

Anusha Roshini Alagu
Chokri Boumrifak
Luisa Fernanda López González

Editor

DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.

Responsable del contenido de acuerdo con los términos de las leyes de prensa

Chokri Boumrifak
DECHEMA e.V.
Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt am Main
Germany

Email: chokri.boumrifak@dechema.de

Fecha de publicación

Julio de 2024

Gráficos y maquetación

Chokri Boumrifak

Versión en español traducida del texto original en inglés

Texto traducido por

Eliana Cintia Scasserra

Imágenes traducidas por

Luisa Fernanda López González



DECHEMA
Gesellschaft für Chemische Technik
und Biotechnologie e.V.
Theodor-Heuss Allee 25
60486 Frankfurt am Main
Germany
Phone: +49 (0)69 7564-0
Fax: +49 (0)69 7564-117
E-Mail: info@dechema.de

Crédito de la fotografía

Pixabay.com

Portada - burbujas de aire 7321448 por @Kranich17, Michaela

Capítulo 2 - laberinto 4397464 por @Alexas_Fotos

Unsplash.com

Capítulo 1 - Burbujas, iKPxCjUU_bg por @kerber, Marko Blažević

Capítulo 3 - Cielo, 8osv993lUKI-unsplash por @alexmachado, Alex Machado

Capítulo 3 - Fábrica SLIFl67jv5k por @rozetsky, Ant Rozetsky

Capítulo 3 - Estanques Ac97OqAWDvg por @unstable_afliction, Ivan Bandura

Capítulo 4 - Ventilador 1WXSZdzkYyU por @emiliano_fanti, Emiliano Fanti

Capítulo 5 - Torre de adsorción RHLBWUAFo_o por @isawred

Financiado por



Supported by:



on the basis of a decision
by the German Bundestag

Implemented by:



Tabla de contenidos

| | |
|---|-----------|
| Abreviaturas | 1 |
| Prólogo | 2 |
| 1 Introducción | 6 |
| 2 Carbono como materia prima | 8 |
| 3 Fuentes de carbono | 12 |
| 3.1. Sector energético | 12 |
| 3.2. Sector industrial | 13 |
| 3.2.2. Producción de cemento | 13 |
| 3.2.3. Producción de celulosa y papel | 14 |
| 3.2.4. Fabricación de hierro y acero | 15 |
| 3.2.5. Fabricación de aluminio | 15 |
| 3.2.6. Fabricación de vidrio | 16 |
| 3.3. Fuentes puntuales biogénicas | 16 |
| 3.4. Gestión de residuos y aguas residuales | 18 |
| 3.5. Aire atmosférico | 19 |
| 3.6. Perspectiva de todas las fuentes de CO ₂ | 20 |
| 4 Tecnologías y procesos de captura | 22 |
| 4.1. Tecnologías de captura | 22 |
| 4.1.1. Absorción química: tratamiento de gases con aminas | 22 |
| 4.1.2. Métodos de adsorción | 25 |
| Adsorción por oscilación de presión (PSA) | 25 |
| Adsorción por oscilación de presión al vacío (VPSA) | 26 |
| 4.1.3. Separación criogénica | 26 |
| 4.1.4. Separación por membrana | 27 |
| 4.1.5. Nuevos proyectos con microalgas y enzimas | 28 |
| 4.2. Procesos de captura | 28 |
| 4.2.1. Captura directa del aire | 28 |
| 4.2.2. Estrategias de captura para la quema de combustibles | 30 |
| Precombustión | 30 |
| Poscombustión | 30 |
| 5 Transporte y almacenamiento | 34 |
| 6 Conclusiones | 36 |
| Literatura | 38 |

Abreviaturas

| | |
|--|---------------------------------|
| Óxido de aluminio | Al ₂ O ₃ |
| Horno básico de oxígeno | BOF |
| Bioenergía con captura y almacenamiento o utilización de carbono | BECCS/U |
| Alto horno | BF |
| Captura y almacenamiento de carbono | CCS |
| Captura y utilización de carbono | CCU |
| Carbonato de calcio | CaCO ₃ |
| Dióxido de carbono | CO ₂ |
| Monóxido de carbono | CO |
| Combustión química en bucle | CLC |
| Central eléctrica de ciclo combinado | CCPP |
| Éter dimetílico | DME |
| Captura directa del aire | DAC |
| Hierro de reducción directa | DRI |
| Horno de arco eléctrico | EAF |
| Recuperación mejorada de petróleo | EOR |
| Bacteria electroactiva | EAB |
| Gases de efecto invernadero | GHG |
| Hidrógeno | H ₂ |
| Gasificación integrada en ciclo combinado | IGCC |
| Líquido iónico | IL |
| Estructuras metal-orgánicas | MOF |
| Captura electrolítica microbiana de carbono | MECC |
| Electrosíntesis microbiana | MES |
| Monoetanolamina | MEA |
| Oxígeno | O ₂ |
| Power-to-Gas | PtG |
| Power-to-Líquid | PtL |
| Power-to-X | PtX |
| Adsorción por oscilación de presión | PSA |
| Energía renovable | RE |
| Dióxido de silicio | SiO ₂ |
| Carbonato de sodio | Na ₂ CO ₃ |
| Nivel de madurez tecnológica | TRL |
| Tonelada | t |
| Adsorción por oscilación de presión al vacío | VPSA |
| Agua | H ₂ O |

Prólogo

Este documento se elaboró dentro del marco del International PtX Hub. Este proyecto apoya el desarrollo de Power-to-X (PtX) en una manera sustentable y de los mercados de hidrógeno como pieza clave de la transición energética en países como Marruecos, Sudáfrica y Argentina. La identificación de las fuentes adecuadas de carbono para la producción de PtX se está llevando a cabo actualmente en estos tres países. Este documento brinda una visión general sobre las fuentes de carbono, los métodos de separación, las tecnologías de captura y los requisitos de infraestructura. Las condiciones y los proyectos de cada país socio se pueden evaluar en estudios exhaustivos específicos.

Para combatir el cambio climático, estos países se encuentran en proceso de desarrollar diversas tecnologías para desfosilizar sus procesos y exportar moléculas sustentables. Para lograrlo, los combustibles fósiles necesitan ser reemplazados por electricidad de fuente renovable o por alternativas sustentables adicionales tales como los combustibles sintéticos renovables o biogénicos.

Power-to-X brinda una solución sustentable para producir estas moléculas sustentables mediante la combinación de electrólisis con tecnologías de captura de CO₂ de diferentes industrias, fuentes biogénicas, gestión de residuos o aire atmosférico. Con el objetivo de conseguir la neutralidad del carbono a largo plazo y sustituir las rutas fósiles, las fuentes sustentables de CO₂ de origen biogénico o mediante la captura directa del aire (DAC) serán necesarias a gran escala para cubrir la demanda futura de CO₂ para las rutas PtX.

Este documento aborda las fuentes de carbono de diferentes sectores a nivel global. Esto ofrece una idea de la cantidad actual de CO₂ emitido. Además, el informe cubre los numerosos aspectos de tecnologías y procesos de captura de carbono, incluyendo la infraestructura para el transporte y el almacenamiento. Para esto, se describen y evalúan las tecnologías más avanzadas, teniendo en cuenta sus potenciales y limitaciones. Las posibilidades detalladas de transporte y almacenamiento se encuentran muy condicionadas por las circunstancias regionales y pueden determinarse en estudios futuros.

La implementación de las fuentes de carbono en las aplicaciones PtX implica una infinidad de desafíos relacionados con la escalabilidad y sustentabilidad. La incertidumbre sobre los costos probables del aprovechamiento de las fuentes de carbono es también un desafío importante. Todos estos desafíos deben resolverse para que el desarrollo de las tecnologías sea exitoso.

Resumen ejecutivo

En el camino hacia una transformación industrial más sustentable y menos dependiente de los recursos fósiles, es indispensable un enfoque hacia tecnologías alternativas e innovadoras. Las llamadas tecnologías Power-to-X (PtX) juegan un rol importante en los sectores que son difíciles de electrificar. A pesar del gran potencial de PtX, su dependencia de una fuente de carbono para la mayoría de los productos es generalmente pasada por alto. El uso de dióxido de carbono (CO₂) representa una opción adecuada, ya que el CO₂ puede obtenerse como producto residual en muchos sectores industriales, extraerse de los recursos biogénicos o ser capturado directamente del aire atmosférico.

La aplicación de la captura de carbono en el contexto de PtX requiere tener en cuenta numerosos aspectos, incluyendo la identificación de una fuente de CO₂ fiable, la extracción del gas mediante diversos métodos y tecnologías y el uso final como materia prima del carbono (Figura 0.1). Factores tales como la cantidad, calidad, sustentabilidad, viabilidad y escalabilidad de las diversas rutas de captura son cruciales para permitir la implementación industrial de PtX.

Fuentes

La pureza y el método de captura del CO₂ puede variar considerablemente dependiendo de la fuente. Además, si la ruta de proceso también implica la utilización de recursos fósiles, deben tenerse en cuenta consecuencias adicionales relativas a la sustentabilidad y a los posibles efectos de lock-in o bloqueo de carbono. Por lo tanto, el CO₂ puede categorizarse según su origen de los sectores energético e industrial, de fuentes biogénicas, de residuos y aguas residuales o directamente del aire atmosférico (Figura 0.1). La categorización del origen de la fuente del carbono ya separa los sectores que dependen de los procesos de combustión, tales como el sector

energético y el industrial. Mientras que las fuentes procedentes de los residuos, el CO₂ biogénico y la captura directa de aire tienen potencial para implementarse en un ciclo cerrado del carbono. Sin embargo, la calidad y disponibilidad de estas fuentes necesitan coincidir con las rutas de proceso de PtX y dependen en algunos casos de la madurez de los métodos de separación y captura.

El **sector energético** emite el 43 % de las emisiones globales de CO₂, originado principalmente de la combustión de combustibles fósiles para generar calor y electricidad. Los beneficios ambientales del uso de CO₂ procedentes de este sector son limitados, ya que el CO₂ se emitirá en la atmósfera al final de la vida útil del producto PtX. Además, actualmente se están realizando esfuerzos a escala mundial para evitar las emisiones desde el sector energético, lo que significa que la disponibilidad del CO₂ proveniente de este sector será reducida drásticamente en un futuro inmediato.

El **sector industrial** consume una cantidad considerable de energía, que produce emisiones indirectas. Pero además de las emisiones de energía, los procesos industriales también producen CO₂ como un subproducto en algunas reacciones químicas. Las emisiones de estos procesos representan el 4 % de las emisiones mundiales de CO₂ y se originan en la producción de cemento, hierro y acero, productos químicos y petroquímicos, celulosa y papel; y aluminio, entre otros.

El **CO₂ biogénico** se produce a partir de la conversión de biomasa en productos tales como el bioetanol o el biogás, o de la combustión de dicha biomasa y sus productos derivados. La utilización de CO₂ biogénico para la producción de PtX puede promover un ciclo cerrado del carbono si la producción y el uso de la biomasa seleccionada se llevan a cabo de manera sustentable.

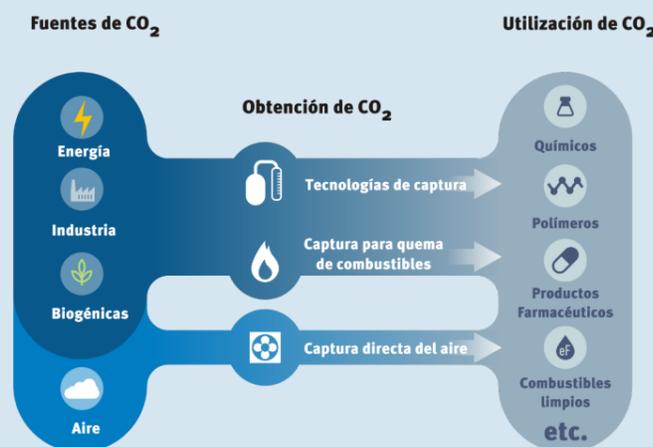


Figura 0.1 Las rutas de PtX basadas en carbono dependen de tres elementos básicos: la identificación de la fuente de CO₂, la extracción de CO₂ mediante una separación o un método de captura y la utilización del CO₂ para generar un producto de valor agregado.

En la **gestión de residuos y de aguas residuales** se procesa una parte considerable de material orgánico. En la actualidad, la incineración de residuos sólidos es la fuente principal de CO₂ de este sector. Sin embargo, el desarrollo de la captura de CO₂ mediante el procesamiento de materiales orgánicos avanza en este campo. Los materiales procedentes de residuos sólidos se pueden procesar y reutilizar como materia prima para materiales de construcción y el CO₂ de la combustión puede capturarse para mitigar sus emisiones. El agua residual puede tratarse mediante diversos enfoques microbianos que convierten el material orgánico en productos químicos y CO₂ con valor agregado.

El **aire atmosférico** contiene CO₂ en proporciones extremadamente pequeñas y se encuentra igualmente disponible como fuente en todas las regiones. Aunque su separación demanda una cantidad considerable de energía, esta fuente de carbono puede ser utilizada en regiones con buena disponibilidad de recursos renovables. En paralelo a las fuentes biogénicas, el CO₂ procedente del aire atmosférico podría crear un ciclo cerrado del carbono, siempre y cuando su captura se lleve a cabo 100 % con energías renovables.

Tecnologías de captura

Para capturar el CO₂ presente en una corriente, existen distintos métodos de separación que dependen de factores tales como la composición del flujo, la eficiencia y la rentabilidad.

El tratamiento de gas con aminas es la tecnología más madura (TLR 9) de todos los métodos de separación de CO₂, la cual ha sido ampliamente comercializada. Otras técnicas de separación, tales como la separación criogénica, la adsorción por oscilación de presión (PSA), la adsorción por oscilación de presión al vacío (VPSA), la separación por membrana y la combustión química en bucle se utilizan también en menor escala en la separación de CO₂.

Procesos de captura

Hay tres enfoques principales para capturar el CO₂ generado por la combustión de combustibles fósiles, biomasa o mezclas de estos combustibles. Además, el CO₂ puede capturarse directamente de la atmósfera.

La **captura directa de aire** (DAC) separa el CO₂ del aire y tiene un alto potencial como tecnología limpia de carbono en PtX sustentable. No obstante, este proceso de captura todavía no tiene la madurez suficiente para aplicaciones a escala industrial y requiere enormes cantidades de energía que deben ser suministradas por recursos renovables.

El enfoque de **poscombustión** separa el CO₂ de los gases de combustión producidos por la quema del combustible primario en presencia de aire. Esta tecnología es la elegida para las centrales eléctricas existentes, por su alto grado

de madurez y porque puede incorporarse fácilmente tanto a las centrales nuevas como a las ya existentes. Sin embargo, esta tecnología se caracteriza por la baja eficiencia de la captura de carbono debido a las bajas concentraciones de CO₂ en los gases de combustión.

La **precombustión** utiliza la gasificación del combustible primario en un reactor con vapor y aire u oxígeno para producir gas de síntesis. De esta manera, el CO₂ es eliminado del proceso antes de que ocurra la combustión. La precombustión se implementa en las centrales eléctricas que utilizan la tecnología de gasificación integrada en ciclo combinado (IGCC). Este enfoque de captura no puede implementarse en las plantas existentes, pero es altamente eficiente, y el proceso de separación es más fácil comparado con la poscombustión.

La **oxicombustión** utiliza oxígeno puro en vez de aire para la combustión del combustible primario y produce un gas de combustión que consiste principalmente en vapor de agua y CO₂. Las principales ventajas de la oxicombustión son la reducción de las emisiones de NOx, la alta pureza del CO₂ y el menor volumen de gas.

Utilización

Las fuentes de carbono pueden utilizarse a través de rutas de producción ya existentes o en nuevos procesos establecidos para sintetizar productos químicos con valor agregado. La mayoría de las rutas de producción tradicionales que se basan en el gas de síntesis (una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono) puede llevarse a cabo con hidrógeno sustentable y fuentes de carbono. Diversos productos químicos básicos, polímeros y combustibles sintéticos pueden producirse mediante estos procesos. Las rutas de producción principales con CO₂ como materia prima incluyen síntesis de metanol (precursor para combustibles, polímeros, ácidos, etc.), Fischer-Tropsch (combustibles, ceras, nafta y metano) y procesos de carbonilación. La adaptación de estas rutas de producción a un concepto de PtX requiere nuevas tecnologías para convertir el CO₂ en el precursor respectivo. Entre los casos de uso más avanzado para PtX se encuentran los procesos Power-to-Liquid (PtL) para la producción de combustibles sintéticos.

Infraestructura

A medida en que la escala de producción de PtX y del suministro de carbono aumente, será necesaria una infraestructura de CO₂ especializada y funcional. Esto incluye la purificación, compresión, el transporte y almacenamiento para garantizar una implementación exitosa en la cadena de valor de PtX. El CO₂ puede transportarse de varias maneras, como por ejemplo en camiones, barcos o gasoductos. Sin embargo, a gran escala y con distancias cada vez mayores, el desarrollo de gasoductos es la forma más viable de gestionar los flujos de CO₂ entre el proveedor y el comprador.

1 Introducción

1 Introducción

1 Introducción

La mitigación de las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono (CO₂) es una medida necesaria para reducir el impacto del cambio climático. Por lo tanto, reducir la concentración del CO₂ de la atmósfera y de los procesos emitenes es una contribución necesaria a la reducción de los gases de efecto invernadero (GHG). El CO₂ puede almacenarse de forma permanente o utilizarse como materia prima de carbono. Ante todo, las tecnologías Power-to-X (PtX) ofrecen una amplia variedad de aplicaciones para el CO₂ como materia prima, en particular, en los sectores difíciles de electrificar o que aún necesitan producir hidrocarburos. PtX comienza con la producción de hidrógeno verde y se extiende a numerosas materias primas que incluyen hidrocarburos como productos derivados (combustibles sintéticos, polímeros, productos químicos básicos, etc.). Esto le permite una transición hacia un funcionamiento sustentable a las industrias basadas en fuentes fósiles. Las causas principales del aumento de la concentración de CO₂ en la

atmósfera son comúnmente la extracción y la quema de hidrocarburos fósiles. Este proceso puede simplificarse como una reacción de combustible con el oxígeno, que produce CO₂ y agua (Figura 1.1).

Por lo tanto, evitar la quema de recursos fósiles contribuye directamente a reducir las emisiones de CO₂. Sin embargo, algunos sectores industriales, por ejemplo, la industria del acero o del cemento, producen emisiones inevitables por motivos relacionados con el proceso (no necesariamente de fuentes fósiles). En estos casos, los procesos no poseen materias primas o rutas de producción alternativas [1]. Además, hay fuentes de CO₂ que no proceden de fuentes fósiles, tales como las de origen biogénico o del tratamiento de residuos. Todos estos ejemplos son considerados fuentes potenciales de carbono para las aplicaciones de PtX. Mediante procedimientos innovadores de PtX, el CO₂ puede convertirse en hidrocarburos.

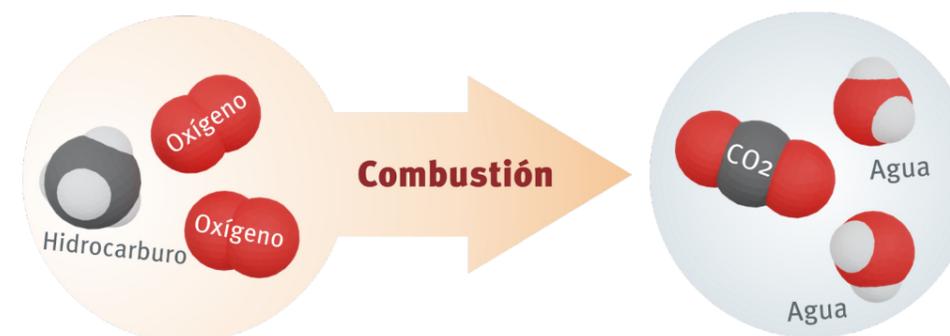


Figura 1.1 La principal causa del aumento de CO₂ perjudicial para el clima son los procesos de combustión. Los hidrocarburos reaccionan con oxígeno y dan como resultado CO₂ y agua.

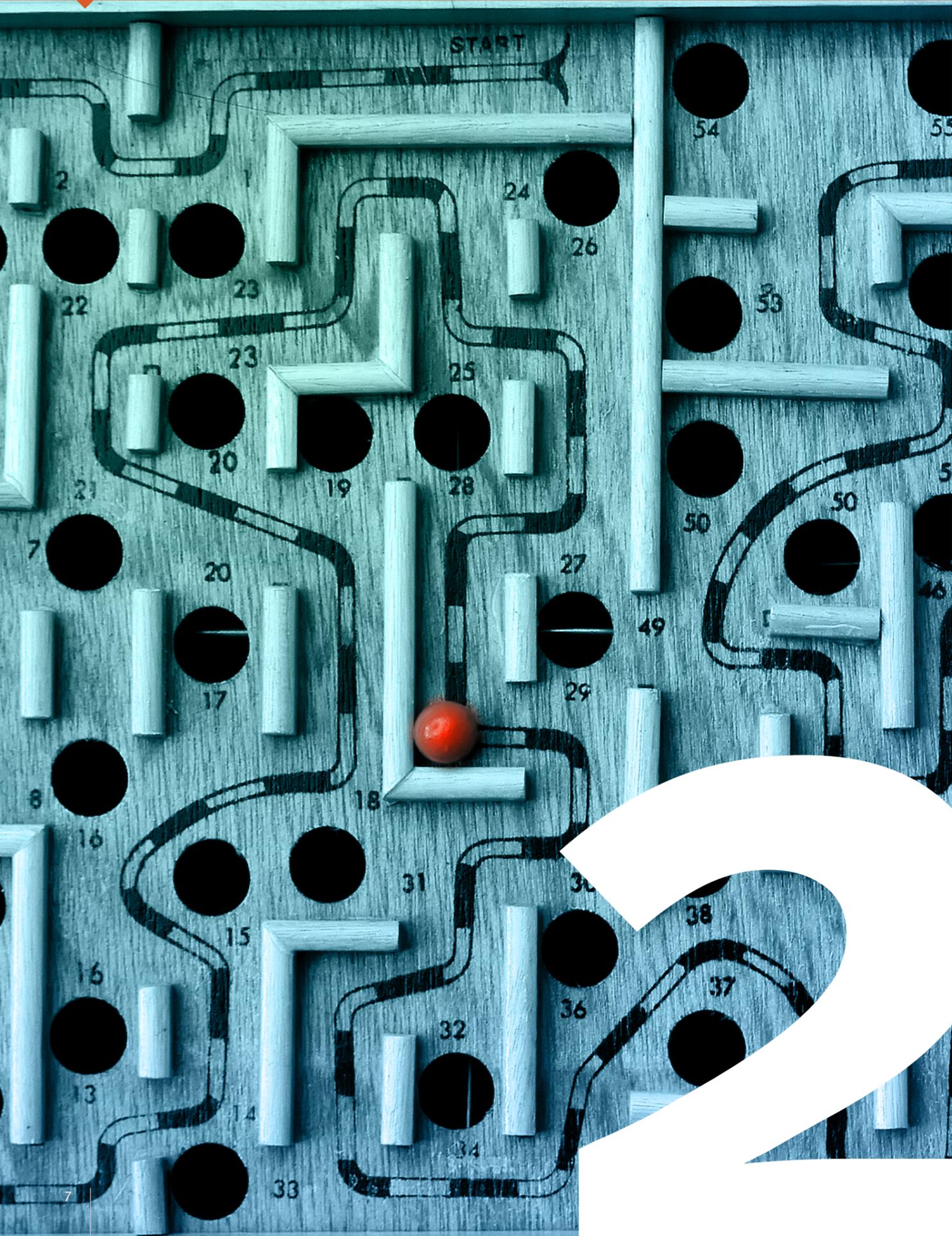
En la actualidad, el CO₂ ya se utiliza en algunos campos tales como en la industria bebidas para agregar gas a las bebidas gaseosas, como agente limpiador en la industria textil, como materia prima en la producción de urea y como medio refrigerante en diversos procesos, entre otros. El CO₂ representa un recurso de carbono relevante y disponible para la industria que, sin embargo, raramente se considera como tal. Por lo tanto, muchas preguntas sobre las fuentes potenciales de CO₂, las cantidades y la infraestructura para un desarrollo a gran escala siguen sin respuesta. Además, la disponibilidad y madurez de los métodos de captura de carbono deben tenerse en cuenta.

Este informe ofrece una visión general sobre los requisitos técnicos y el desarrollo en el uso de CO₂ para aplicaciones PtX y se centra en:

- fuentes puntuales de CO₂
- métodos de separación y tecnologías de captura de CO₂
- Infraestructura de CO₂

Adicionalmente, se muestra la disponibilidad y madurez de las distintas tecnologías para poder comparar las distintas opciones de implementación.

2 Carbono como materia prima



2 Carbono como materia prima

2 Carbono como materia prima

El concepto de PtX se basa en la conversión de recursos renovables a vectores energéticos y materiales como alternativa a las rutas convencionales basadas en fuentes fósiles. El desarrollo de diversas cadenas de valor PtX podría brindar una notable variedad de productos que pueden servir como materia prima sustentable. Estas nuevas vías de producción pueden considerarse contribuciones cruciales para la transformación del sector de la movilidad y de la industria química. Un elemento central de este concepto es la síntesis de hidrógeno verde y, sobre todo, de sus derivados, incluidos los hidrocarburos y el amoníaco.

Productos químicos

Para que la aplicación del PtX sea viable, sus productos deben competir con las materias primas químicas tradicionales, tales como el gas de síntesis. Definido como una mezcla compuesta de hidrógeno y monóxido de carbono (CO), el gas de síntesis se obtiene convencionalmente a partir de recursos fósiles. La versatilidad del gas de síntesis, en particular, como precursor de una infinidad de hidrocarburos, resalta su importancia para la industria química.

Las principales vías de producción de hidrocarburos en PtX incluyen la síntesis de metanol, el proceso Fischer-Tropsch (combustibles, ceras, nafta y metano), la carbonilación, los oxoalcoholes y el dimetil éter (DME). Como muestra la Figura 2.1, muchos hidrocarburos sirven como productos químicos base y pueden producirse mediante rutas sustentables bajas en carbono, basadas en CO₂ como materia prima. Notablemente, la nafta producida mediante el proceso Fischer-Tropsch puede usarse como base en la industria química. En consecuencia, las fuentes de CO₂ sustentables han adquirido protagonismo como materias primas vitales para facilitar el desarrollo de PtX.

Diversas aplicaciones de PtX dependen de CO₂ como fuente de carbono, el cual puede ser extraído de la atmósfera o de fuentes puntuales biogénicas e industriales. Estas vías innovadoras ofrecen la oportunidad de reducir la dependencia de combustibles fósiles en la industria y, consecuentemente, pueden contribuir a mitigar las emisiones industriales de CO₂. Esta iniciativa requiere necesariamente un cambio en la producción convencional de hidrocarburos hacia nuevas rutas de producción de PtX [2].

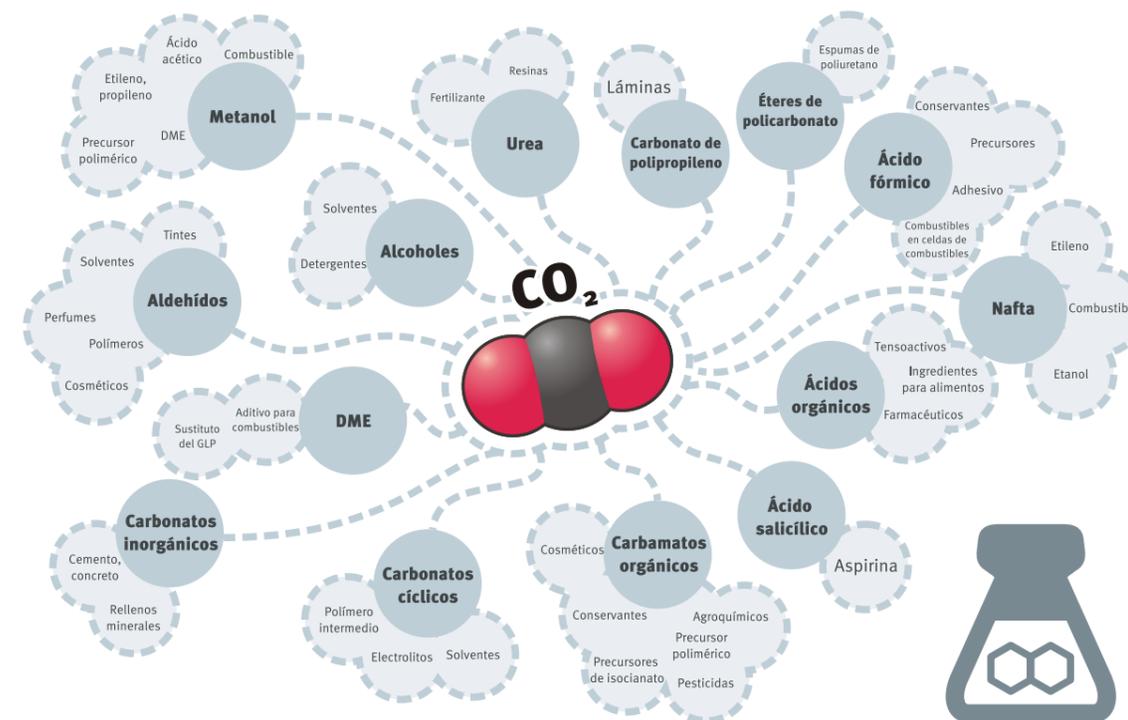


Figura 2.1 Rutas y el desarrollo de CO₂ como materia prima para la producción de productos químicos con valor agregado. [2]

2 Carbono como materia prima

Actualmente, la mayor demanda de CO₂ en cifras absolutas deriva de la producción de urea. Sin embargo, otros numerosos procesos aplican CO₂ en escala comercial mediante la producción de carbonatos cíclicos y ácidos salicílicos (0,1 Mio t/a). [2]. Además, el CO₂ sirve como comonomero para diversos polímeros. Dependiendo de la ruta de producción, la demanda de CO₂ como materia prima puede variar entre alrededor de 0,7 y 6 t_{CO2}/t_{producto} (ver la Figura 2.2).

Comúnmente utilizados para la producción de epóxidos, láminas y espumas, el carbonato de polipropileno y los esteroides de policarbonato son polímeros que pueden basarse en CO₂. Existen dos actores industriales (Novomer Inc., EE. UU.; Covestro, Alemania) que operan en esta área (TRL 7-9). DNV (Noruega) produce ácido fórmico en escala piloto con 1 kg/día mediante reducción electroquímica de CO₂, y Mantra Energy Alternatives (Canadá, TRL 7) diseñó otra planta con una producción de 100 kg/día [3]. Una tecnología crucial es la electrorreducción de CO₂ que se encuentra aún en desarrollo. Sin embargo, empresas como Topsoe ofrecen electrolizadores comerciales para la reducción de CO₂ a CO [4]. Otro proceso a una escala pequeña con un gran potencial es el uso directo de CO₂ para la síntesis de DME que requiere 0,125 t_{CO2}/t_{DME}.

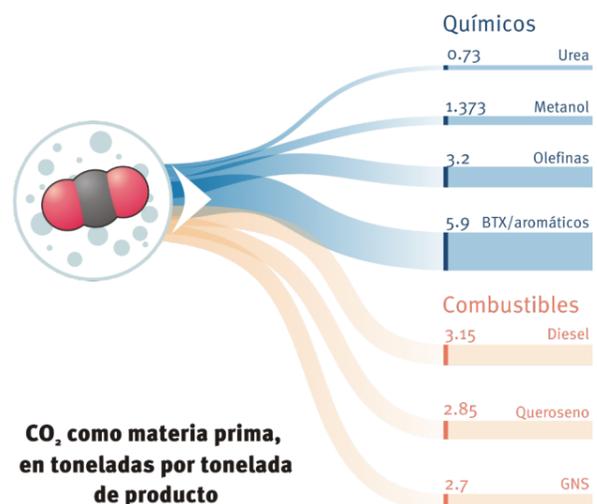


Figura 2.2 Comparación de la demanda de CO₂ en rutas de baja emisión [2]

Combustibles sintéticos

Debido a que las tecnologías PtX todavía no se encuentran disponibles en escala industrial, aún es necesario un mayor desarrollo para poder reemplazar los procesos que se basan en los combustibles fósiles. Sin embargo, la madurez y el potencial de PtX está creciendo rápidamente y se están desarrollando múltiples vías de producción a escala industrial.

Existen muchos otros procesos alternativos para las rutas de PtX tales como los combustibles sintéticos a partir de

microalgas [5] o los procesos termoquímicos de alta temperatura (por ejemplo, Synhelion [6]) pero estos requieren mucha más investigación y desarrollo para alcanzar una escala comercial [7]. Mientras que la producción de combustibles sintéticos vía Fischer-Tropsch o la producción de metanol se llevan a cabo en una multitud de proyectos con una escala de demostración cada vez mayor y una elevada demanda de CO₂.

La mayor ventaja de la producción de combustibles sintéticos radica en la posibilidad de utilizarlos con la infraestructura existente. Adicionalmente, tecnologías como el proceso Fischer-Tropsch se han desarrollado durante mucho tiempo. Como consecuencia, el Power-to-Liquid (PtL) (el concepto más amplio del PtX) se destaca como una de las tecnologías más maduras en comparación con otras rutas del PtX.

Diversos proyectos internacionales trabajan en la implementación de tecnologías PtL para alcanzar una escala comercial. La construcción de una planta PtL por parte de la empresa alemana INERATEC comenzó en 2023 y producirá 2500 toneladas de combustibles sintéticos por año [8]. En el parque industrial Höchst se producirán hasta 4,6 millones de litros de combustibles sintéticos a partir de 10 000 toneladas de CO₂ biogénico proveniente de una central de biogás. La organización alemana sin fines de lucro Atmosfair utiliza 2,3 % DAC y una central de biogás para suministrar CO₂ en un proyecto de electroqueroseno [9]. Norsk e-Fuels también sigue una iniciativa combinada con DAC y CO₂ a partir de flujos de gases residuales biogénicos. En total, Norsk e-Fuels planea producir hasta 250 millones de litros de combustibles sintéticos para 2030. Esta empresa se enfoca en el sector de la aviación (80 %) y en la nafta residual como materia prima para la industria química [10]. Una planta de metanol verde en Tasmania de Abel energy recibirá carbono biogénico para producir alrededor de 200 000 hasta 300 000 toneladas de metanol por año [11]. En Francia, el productor de acero ArcelorMittal en sociedad con ENGIE e Infinium capturará 300 000 toneladas de CO₂ por año para la producción de combustibles sintéticos en un proyecto llamado Reuze [12]. Una planta china capturará 150 000 toneladas de CO₂ por año a partir de otros procesos industriales para generar 100 000 toneladas de metanol por año [13]. En los Estados Unidos, la empresa Infinium usará 18 000 toneladas de CO₂ por año para producir electroqueroseno y electrodiésel [14]. Todas estas iniciativas son los primeros pasos para alcanzar la escala industrial de la producción de combustibles sintéticos. A largo plazo, una fuente sustentable y suficiente de CO₂ como materia prima debe suministrarse para productos PtX tales como combustibles sintéticos.

2 Carbono como materia prima

La valorización de las fuentes puntuales industriales hace posible cubrir la demanda del desarrollo de PtX. Sin embargo, existe el peligro de crear un cuello de botella, ya que todos los sectores aspiran a reducir sus emisiones de CO₂ y así alcanzar la neutralidad de carbono hasta el 2050. Por lo tanto, estas fuentes puntuales van a disminuir en las próximas décadas, lo que conlleva a la necesidad de buscar fuentes alternativas de carbono de origen biogénico y a desarrollar la DAC de manera acelerada (Figura 2.3) [2]. Aunque la DAC a gran escala no se encuentra aún establecida en el corto plazo, los escenarios a largo plazo muestran que la demanda de CO₂

aumentará drásticamente. De acuerdo con Ram y otros, la demanda futura de CO₂ para la producción de combustible debería cubrirse principalmente con las contribuciones de la DAC [15].

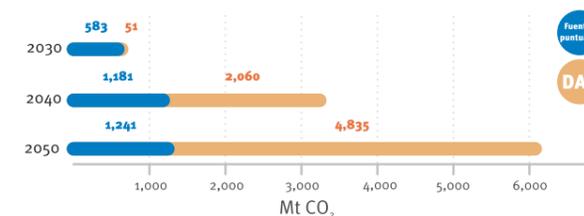


Figura 2.3 Demanda de CO₂ para la producción de combustibles sintéticos [15]

Reemplazo de las cadenas de suministro de productos petroquímicos

El sector químico y petroquímico representa la base de innumerables cadenas de valor derivadas. Con un valor de producción global de alrededor de 6 billones de dólares estadounidenses (2017) que sigue creciendo hasta hoy, este sector destaca su relevancia económica. Sin embargo, el sector depende fuertemente de recursos fósiles y necesita urgentemente desfosilizar su producción. Los recursos fósiles se utilizan como combustibles y como materia prima, lo que convierte a la industria química y petroquímica en uno de los principales contribuyentes a las emisiones industriales de CO₂ a nivel mundial [141-143].

La escala de producción en sí misma puede convertirse en un desafío para el proceso de transformación. Solo la producción de plásticos aumentó 360 Mt/a en 2018. En 2020, la producción de amoníaco en la industria de los fertilizantes alcanzó 175 Mt/a, y otro producto químico base importante, el metanol, ascendió a alrededor de 100 Mt/a en 2019 [141]. Para reemplazar estas cadenas de valor fósil, se están desarrollando nuevas rutas de producción para un futuro

sustentable en el sector químico y petroquímico con tecnologías PtX. Como se muestra en la Figura 2.4, los recursos fósiles serán reemplazados por materias primas que también contienen carbono para producir hidrocarburos. Entre las opciones comunes para establecer fuentes de carbono alternativas se encuentran la biomasa, los procesos de reciclado y el CO₂ a partir de diversas fuentes. La biomasa tiene capacidades limitadas y, a pesar de los proyectos a largo plazo, los enfoques económicos circulares todavía no se han desarrollado. El CO₂, como un pilar más para establecer fuentes de carbono limpias, se vuelve indispensable.

Sin embargo, esta transición tiene un costo. Los análisis tecnoeconómicos muestran que la desfosilización total en el sector petroquímico aumentará los costos de energía y de materias primas en más de 35 %. Las alternativas bajas en carbono conllevarán un alto costo y requerirán medidas regulatorias adicionales para llegar a ser competitivas con los productos de origen fósil [141].

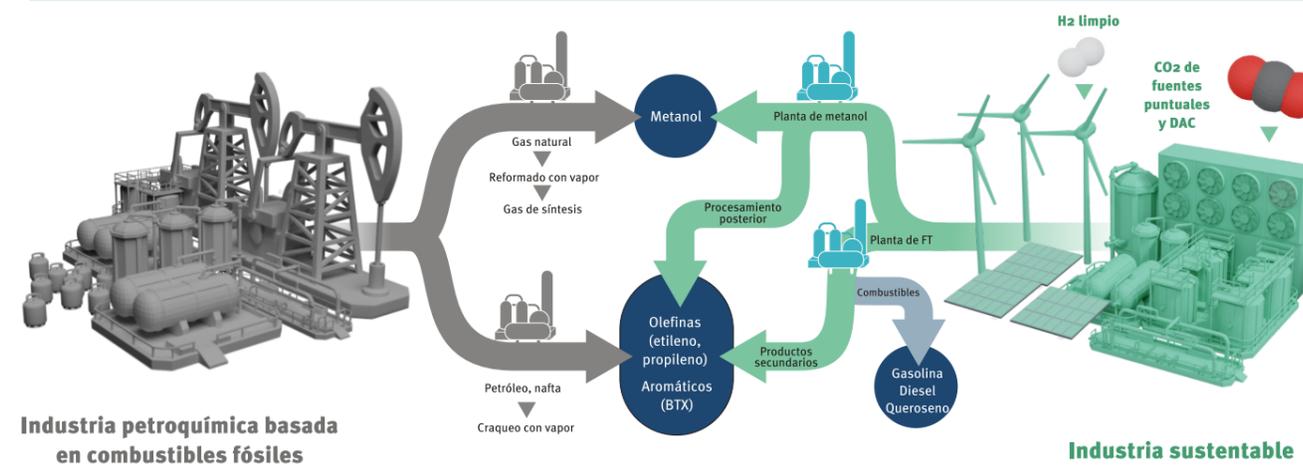


Figura 2.4 Las tecnologías PtX brindan rutas de producción sustentable para la industria petroquímica [142].

3 Fuentes de carbono



3 Fuentes de carbono

3 Fuentes de carbono

Las fuentes industriales, biogénicas y el tratamiento de residuos ofrecen CO₂ para los productos PtX. Este gas también puede separarse directamente del aire atmosférico en un proceso conocido como captura directa del aire (DAC).

Es importante mencionar que el CO₂ utilizado para la producción de PtX no se captura permanentemente debido a que, al final de la vida útil de la mayoría de los productos PtX, el carbono enlazado eventualmente se liberará en la atmósfera en forma de CO₂. En el caso de fuentes provenientes del aire atmosférico y de las biogénicas, el CO₂ liberado al final de la vida útil del producto iguala al CO₂ previamente capturado por la DAC o la biomasa. En consecuencia, estas fuentes pueden brindar un ciclo de carbono cerrado si la energía utilizada para el proceso de captura es renovable. Por otro lado, las fuentes de carbono provenientes de fuentes fósiles siempre generarán emisiones positivas si se utilizan como materia prima de carbono. En consecuencia, todas las fuentes de carbono requieren una evaluación previa crítica.

Asimismo, las fuentes puntuales de CO₂ varían en concentración y consumo de energía para el proceso de captura. Por esta razón, la elección de la fuente no solo debe ajustarse a la calidad y cantidad requerida para la producción de rutas, sino que también impacta la huella de carbono y, por lo tanto, la sustentabilidad del producto final.

Las fuentes puntuales son plantas estacionarias que emiten CO₂ a la atmósfera como consecuencia de sus procesos de producción. Estas emisiones pueden ser resultado de un proceso de combustión (emisiones

atribuidas a la generación de energía) o de una reacción de proceso en la que el CO₂ es un subproducto (emisiones atribuidas al proceso).

Los sectores energético e industrial se consideran como fuentes puntuales y se describen en los capítulos 3.1 a 3.3.

La figura 3.1 muestra la participación de diferentes sectores en las emisiones totales de CO₂ en 2019 a nivel global. Se puede ver que el sector industrial representa el 4 % de las emisiones totales de CO₂, mientras que el sector energético (electricidad y calor) representa el 43 % (que también contabiliza las emisiones de energía para el consumo de la industria) [16].

3.1. Sector energético

El sector energético incluye todas las industrias que extraen, producen y suministran energía en forma de electricidad y calor. El sector energético es responsable del 43 % de las emisiones totales de CO₂ en todo el mundo en gran parte, debido a la combustión de combustibles fósiles, así como de residuos industriales y urbanos no renovables [16] (ver la Figura 3.1). En 2019, el 84 % del consumo mundial de energía primaria fue generado a partir de combustibles fósiles (33 % petróleo, 27 % carbón y 24 % gas natural) y en menor proporción de energía nuclear (4,3 %) y energías renovables (11,4 %) [17] (ver la Figura 3.2).

En este sector, el 72 % de las emisiones de CO₂ son causadas por el uso de carbón, el cual posee el factor más alto de emisión de todos los combustibles fósiles [18].

Las concentraciones de CO₂ de los gases de combustión en las centrales eléctricas de carbón y gas varía entre 10 y 15 % y 4 y 5 %, respectivamente [19].

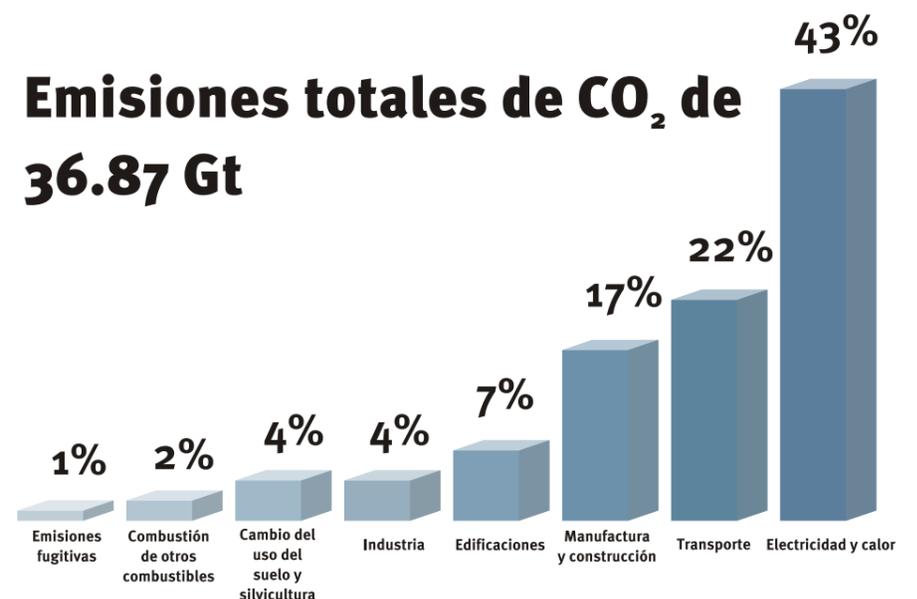


Figura 3.1 Emisiones de CO₂ por sector en 2019. Ilustración propia según [16]

3 Fuentes de carbono

Sin embargo, el sector energético no es una fuente adecuada de CO₂ para PtX a largo plazo por las siguientes razones:

- El sector energético tiene la posibilidad de reemplazar el consumo de combustibles fósiles por la generación de energía a partir de energías renovables. En este sentido, se están realizando esfuerzos a nivel mundial para descarbonizar el sector y reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero, incluido el CO₂.
- Existe el riesgo de que se produzca un efecto de lock-in o bloqueo de carbono en este sector al incentivar un mayor uso de combustibles fósiles si el CO₂ emitido se comercializa. Esto es especialmente crítico para recursos con altos factores de emisión como es el caso del carbón.
- El beneficio ambiental del uso de CO₂ del sector energético es limitado, ya que al final de la vida útil del producto PtX, el carbono fósil original se liberará nuevamente en forma de CO₂.

3.2. Sector industrial

La vinculación del sector industrial con la producción de PtX brinda la posibilidad de integrar la infraestructura existente y altamente desarrollada de este sector a la cadena de valor de PtX.

El sector industrial es responsable por el 4 % de las emisiones mundiales de CO₂ [16] (ver la Figura 3.1). En 2018, las emisiones de CO₂ del sector industrial alcanzaron los 8,54 Gt_{CO2} y las respectivas participaciones de los distintos subsectores se muestran en la Figura 3.3. La industria cementera y la siderúrgica fueron los principales emisores de este gas de efecto invernadero: 27 % y 25 % respectivamente.

3.2.1. Industria química

La industria química incluye plantas de operación que transforman materias primas en diferentes procesos para fabricar una gran variedad de productos químicos. El CO₂ se genera a lo largo de las diferentes cadenas de valor en la industria química, ya sea por la combustión de combustibles fósiles o como subproducto en diferentes reacciones químicas. Estas emisiones de CO₂ podrían usarse como fuente de carbono en la producción PtX.

Se realiza una distinción entre los productos químicos básicos y los especiales. Los primeros se producen a gran escala en grandes cantidades y pueden utilizarse en diversos campos, mientras que los segundos se producen a pequeña escala y están más especializados para determinadas aplicaciones.

En 2021, las emisiones de CO₂ en la industria química alcanzaron los 925 Mt_{CO2}. Alrededor de un cuarto de estas emisiones³ de CO₂ son emisiones relacionadas con el proceso químico, mientras que el resto son emitidas por procesos de combustión para generar energía térmica. La industria química y petroquímica es responsable de alrededor del 14 % de las emisiones industriales totales (ver Figura 3.3). Las emisiones relacionadas con el proceso son adecuadas para la captura debido a su alta concentración de CO₂ y el bajo consumo de energía necesario para la separación.

Solo un número limitado de productos químicos básicos es responsable de la mayoría de las emisiones en este sector: amoníaco (417 Mt_{CO2}), metanol (250 Mt_{CO2}) y productos químicos de alto valor⁴ (258 Mt_{CO2})⁵[21].

Actualmente, parte del CO₂ producido en las plantas de amoníaco se separa y se utiliza como materia prima para producir urea. Yara International ASA actualmente opera una planta comercial de captura de CO₂ mediante el proceso de lavado de agua a partir de su producción de amoníaco en Porsgrunn, Noruega. Praxair transporta y comercializa este gas para usos comerciales tales como alimento y bebida, limpieza y productos químicos [22].

3.2.2. Producción de cemento

El cemento es el ingrediente básico del hormigón y, por lo tanto, un material de construcción muy importante. La industria del cemento tiene una alta demanda de energía y es responsable de una gran cantidad de emisiones de CO₂. Para producir cemento, las principales materias primas (piedra caliza, arcilla y marga) se rompen y mezclan con aditivos, antes de quemarse a aproximadamente 1450 °C en un horno para formar clínker. Finalmente, el clínker se muele hasta obtener un polvo fino y se mezcla con aditivos para obtener el producto final [23]. Due to the high temperatures required, the process is highly energy intensive.

En una planta de cemento hay dos fuentes directas de CO₂:

- Las emisiones relacionadas con la energía: producidas a partir de la quema de combustibles (fósiles) para calentar y calcinar la piedra caliza, la arcilla y la arena a 1450 °C [24]. Estas emisiones pueden evitarse mediante el uso de combustibles neutros para el clima.
- Las emisiones relacionadas con el proceso: producidas a partir de la calcinación de la materia prima, la cual produce cal y CO₂ como subproductos. Estas emisiones son inevitables.

3 Fuentes de carbono

En total, la industria cementera es responsable de alrededor del 8 % de las emisiones globales y del 27 % de las emisiones industriales, 50 % de las cuales son atribuidas al proceso e inevitables [25].

Las tecnologías de oxidación parcial, depuración con aminas y bucle de calcio (ver el capítulo 4) para la captura de carbono en la industria cementera han sido probadas a pequeña escala (TRL 6), pero aún deben ser ampliadas. Hills y otros estiman que estarán disponibles comercialmente entre 2025 y 2030 [26]. Heidelberg Cement actualmente está planificando el primer proyecto de captura y almacenamiento de carbono (CCS) a escala industrial del mundo en una planta de producción de cemento de Brevik, Noruega. Este proyecto usará captura por poscombustión para separar, transportar y almacenar permanentemente 400 000 t_{CO2} al año [27]. Esta empresa también colabora en los proyectos Catch4Climate y LEILAC (25 000 t_{CO2} al año [28]) para probar las tecnologías de oxidación y separación directa a escala de planta piloto [29].

3.2.3. Producción de celulosa y papel

La producción de celulosa y papel necesita grandes cantidades de energía debido principalmente a los procesos de secado. El resultado es una gran producción de CO₂ asociada a esa energía, que podría servir como fuente de carbono para la producción de PtX.

El papel y el cartón se utilizan en diversas aplicaciones [30]:

- para almacenar, recolectar y distribuir información: diarios, libros, etc.
- para embalar: cajas, contenedores, etc.
- para usos higiénicos: papel higiénico, toallas de mano, etc.
- para papeles especializados: filtros, papel de soporte, etc.

En 2021, se produjeron en todo el mundo 264 Mt de papel y cartón para embalaje, 96 Mt de papel gráfico y 57 Mt de otros papeles [31]. La industria es responsable del consumo del 33-40 % de todo el comercio mundial de madera industrial [32].

Durante la producción de papel, primero se descortiza la madera, se astilla y se trata mecánica o químicamente para separar sus fibras de celulosa. Luego, la celulosa se refina, se limpia y se envía a la máquina de papel que elimina el agua y presiona las fibras en una hoja. Posteriormente se seca el papel y se prepara para ser transportado [30]. El secado es el paso que demanda más energía en el proceso y, consecuentemente, la mayoría de las emisiones de CO₂ se generan por la quema de combustibles en este paso.

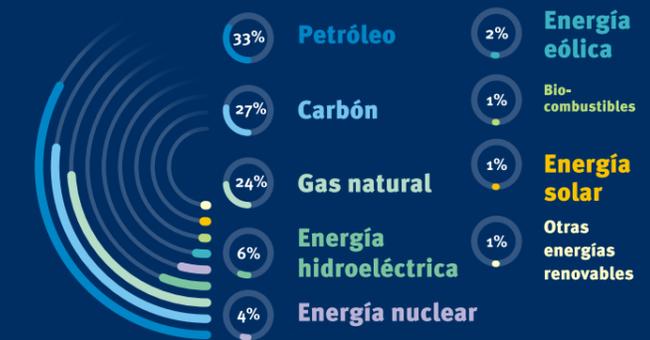


Figura 3.2 Consumo mundial de energía primaria por fuente en 2019. Fuente: elaboración propia basada en Our World in Data [17], Licencia CC-BY de la autora Hanna Ritchie



Figura 3.3 Emisiones de CO₂ directas de la industria en 2018. Fuente: elaboración propia basada en datos de la IEA [20]



Figura 3.4 Composición global de los residuos. Fuente: elaboración propia basada en [59]

1 Solo las emisiones relacionadas con el proceso, ya que las relacionadas con la energía se encuentran en las emisiones de electricidad y calor de la Figura 3.1.
 2 Este número considera las emisiones directas del sector industrial e incluye las emisiones relacionadas con el proceso y las relacionadas con la energía.
 3 Las emisiones relacionadas con el proceso son productos de una reacción química involucrada en la producción del producto principal y no de la quema de combustibles.
 4 Etileno, polipropileno, benceno, tolueno y xilenos.
 5 Cantidad total de emisiones para todos los procesos de producción.

3 Fuentes de carbono

Además, se generan algunas emisiones de proceso en el ciclo de recuperación del licor blanco. Estas emisiones proceden de la materia prima de la madera y, por lo tanto, se consideran biogénicas [33].

En 2021, la industria de la celulosa y el papel emitió alrededor de 190 Mt_{CO₂}, que corresponde aproximadamente al 2 % del total de emisiones del sector industrial [34] (ver Figura 3.3).

SAIPEM y los socios Resolute Forest Products y Les Serres Tundra probaron un primer proyecto comercial de CCU en la industria papelera. Para ello, se capturaron 30 t_{CO₂} por día en la fábrica de celulosa de papel de Resolute en Saint-Félicien, Quebec, y se reutilizarán en el cercano complejo de invernaderos Les Serres Tundra en un paso posterior. La unidad de captura ya fue construida y probada con éxito, pero SAIPEM la está adaptando actualmente [35].

3.2.4. Fabricación de hierro y acero

El acero es una aleación de hierro y carbono. También puede contener pequeñas cantidades de otros elementos tales como manganeso y cromo. Debido a su resistencia y a los bajos costos de producción, el acero se usa a nivel mundial en la construcción de infraestructura, edificios, vehículos, máquinas, etc.

La fabricación de acero es un proceso industrial que demanda mucha energía y, por consiguiente, un emisor de CO₂ y una fuente potencial de carbono para el PtX.

El primer paso en el proceso de producción de acero tiene lugar en el alto horno (BF), donde la materia prima se derrite (mineral de hierro, coque y cal), y el mineral de hierro se reduce para producir hierro fundido y CO₂. A continuación, el hierro fundido se mezcla con chatarra de acero y se trata con oxígeno para eliminar el carbón y otras impurezas en el horno básico de oxígeno (BOF). El CO₂ también se produce en el BOF. Dependiendo del grado de acero deseado, algunos elementos como el cromo se añaden en condiciones específicas para lograr la composición requerida. Luego, el acero fundido se enfría en moldes especiales, se corta a la longitud deseada y se diseña con la forma y el acabado superficial deseados. En el último paso, se alcanza la forma final mediante diferentes métodos tales como el recubrimiento, tratamiento térmico y superficial, etc. [36] [37].

Una segunda opción para producir acero consiste en el hierro de reducción directa (DRI) junto con el horno de arco eléctrico (EAF). En el EAF, la chatarra de acero se funde mediante electricidad de alta tensión y se mezcla con hierro procedente del DRI. El proceso DRI/EAF puede ser menos intensivo en cuanto a emisiones que el BF/BOF si la electricidad utilizada tiene un factor de emisión bajo y el agente reductor es menos intensivo en emisiones que el carbón (por ejemplo, gas natural o hidrógeno) [38].

El sector siderúrgico representa el 25 % de las emisiones industriales de CO₂ (ver la Figura 3.3), lo que corresponde a 2,6 Gt_{CO₂} al año [39].

Las emisiones de CO₂ en la fabricación de acero se producen por tres tipos diferentes de procesos [40]:

- A partir de la quema de combustibles fósiles para alcanzar la alta temperatura necesaria para llevar a cabo reacciones químicas y tratamientos físicos.
- A partir de la reducción de óxido de hierro con un agente reductor como el CO.
- Del uso de la energía y el vapor para las acerías.

La composición habitual del CO₂ en los gases de proceso de las acerías depende del tipo de proceso y varía entre el 1 vol.% y el 17 vol.% [40].

En el proyecto Carbon2Chem, en Alemania, está previsto producir 75 l/día de metanol crudo a partir de los gases metalúrgicos de la central siderúrgica de thyssenkrupp Steel Europe AG en Duisburgo. La fase de evaluación tendrá lugar en mayo de 2024, tras lo cual se espera que comience la producción industrial [41].

ADNOC completó la instalación de CCUS de Al-Reyadah en 2016, con capacidad para capturar 800 000 t_{CO₂} al año de una instalación de producción de Emirates Steel en Emiratos Árabes Unidos. Adicionalmente, esta compañía tiene planes de expandir la capacidad de captura a aproximadamente 5 Mt por año para 2030 [42]. Como ejemplo adicional, ArcelorMittal Gent pondrá en marcha una planta de prueba para capturar unos 300 kg de CO₂ al día procedentes del alto horno y convertirlos en etanol. Mitsubishi Heavy Industries Engineering proporcionará la tecnología de captura y apoyará los estudios de ingeniería [43].

3.2.5 Fabricación de aluminio

El primer paso en la fabricación de aluminio es la producción de alúmina (Al₂O₃), en la que el hidrato de aluminio se extrae de bauxita con una solución de soda cáustica a altas temperaturas. Luego, el hidrato de aluminio se recristaliza a partir la solución mediante el descenso de la temperatura, lavado con agua, secado y calcinado para formar alúmina. [44]

Luego la alúmina se transforma en aluminio en un proceso de electrólisis donde el cátodo y el ánodo están hechos de carbono. En este proceso, el ánodo reacciona con el oxígeno de la alúmina para producir aluminio líquido y CO₂. Dependiendo de la aplicación final, el aluminio se procesa en lingotes de extrusión, lingotes de chapa o aleaciones de fundición [45].

La producción de aluminio es responsable del 3 % de las emisiones directas de CO₂ del sector industrial (ver la Figura 3.3).

3 Fuentes de carbono

Hay tres diferentes tipos de emisiones en la elaboración de aluminio [46]:

- Alrededor del 62 % son emisiones indirectas y surgen del uso de electricidad. Estas emisiones podrían evitarse mediante el uso directo de electricidad renovable.
- Alrededor del 15 % son emisiones directas del proceso, originadas por el consumo de ánodos de carbono durante la fundición de aluminio. El uso de ánodos inertes es una alternativa para evitar estas emisiones, aunque esta tecnología aún se encuentra en desarrollo y no se está disponible comercialmente.
- Alrededor del 16 % son emisiones directas de energía provenientes de la quema de combustibles fósiles para generar las altas temperaturas demandadas. El uso de hidrógeno verde o de otros combustibles de baja emisión podría contribuir a reducir estas emisiones.

3.2.6. Fabricación de vidrio

La fabricación de vidrio genera grandes cantidades de emisiones de CO₂ que podrían utilizarse como materia prima en la producción de PtX.

La arena es la principal materia prima en la producción de vidrio, la cual está compuesta por óxido de silicio (SiO₂). Para reducir el punto de fusión de la sílice, se añade ceniza de soda (Na₂CO₃) a la arena. La piedra caliza o la creta, que están compuestas de carbonato cálcico (CaCO₃), también se añaden al vidrio con el objetivo de mejorar su dureza y su resistencia química [47]. En función de las propiedades deseadas del producto final, se utilizan muchos otros productos intermedios y materiales modificadores.

Para elaborar vidrio, se necesitan temperaturas de alrededor de 1500 °C para derretir las materias primas. Para alcanzar esas altas temperaturas, se lleva a cabo un proceso de combustión en el que los productos de combustión tales como el CO₂, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno se producen y se liberan en la atmósfera.

La quema de combustibles fósiles en la fabricación de vidrio representa el 75 % - 85 % de las emisiones totales de CO₂ en este proceso [48]. Las emisiones restantes consisten en subproductos de las reacciones químicas responsables de convertir las materias primas en el producto final. A nivel mundial, la producción de vidrio genera emisiones anuales de 95 Mt_{CO₂} [49], que corresponden a alrededor del 1 % de las emisiones industriales totales⁶.

Glass Futures, en colaboración con C-Capture de Pilkington UK Ltd, está planeando un proyecto para probar

la captura de carbono en la fabricación de vidrio. C-Capture pretende probar su novedoso proceso de captura en industrias difíciles de descarbonizar [50].

3.3. Fuentes puntuales biogénicas

El CO₂ biogénico se produce por la descomposición, digestión o combustión de biomasa o productos derivados de la biomasa. Este capítulo tiene en cuenta la producción de bioetanol y biogás como fuentes puntuales biogénicas, aunque hay otras fuentes biogénicas disponibles, a saber: el uso de biocombustibles (lo que incluye biogás y bioetanol) para generar electricidad y calor.

Las fuentes biogénicas pueden clasificarse en tres tipos diferentes según la materia prima:

- A partir de materias primas comestibles tales como el maíz y la caña de azúcar. Este tipo de fuente puede ser problemática, ya que genera una competencia directa entre la energía y los cultivos alimentarios.
- A partir de biomasa lignocelulósica como madera, papel y residuos agrícolas.
- A partir de las algas.

Cuando se utiliza biomasa como materia prima en procesos industriales, deben tenerse en cuenta criterios de sustentabilidad como el ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero, la gestión sustentable de los bosques, la protección del aire, el suelo y el agua y la protección de la biodiversidad, entre otros [52]. Además, la utilización de biomasa para usos energéticos o industriales debe evitar la competencia con los alimentos.

El CO₂ biogénico puede obtenerse como subproducto en el procesamiento de la biomasa (producción de bioetanol y biogás, como se explica más adelante) o mediante la combustión de biomasa para la producción de energía, combinada con la captura de carbono. Ambas rutas se denominan bioenergía con captura y almacenamiento/ utilización de carbono (BECCS/U).

La combustión de biomasa en el sector de la generación de bioelectricidad tiene potencial como recurso renovable flexible y equilibrador de la red que complementa a otras fuentes renovables como la eólica y la solar. Además, la generación de calor con biomasa como combustible puede encontrar aplicación en procesos industriales que funcionan a altas temperaturas y que actualmente dependen de combustibles fósiles [53].

Producción de bioetanol

El bioetanol se produce a partir de la fermentación de diferentes materias primas como el maíz y la caña de azúcar. Actualmente, otras materias primas no comestibles están siendo investigadas.

⁶ Cálculo propio según los datos de la Figura 3.1

3 Fuentes de carbono

Tabla 3.1 Ejemplos de captura de CO₂ a partir de la producción de biogás [51]

| Planta de biogás | Ubicación | Alimentación | Producción de CO ₂ | Uso de CO ₂ |
|--|------------------------------|---|-------------------------------|---|
| Korskro (Nature Energy) | Korskro, Dinamarca | Estiércol | 16250 t _{CO2} /a | Industria de alimentos |
| Avedøre | Avedøre, Dinamarca | Aguas residuales | 800 t _{CO2} /a | - |
| Metha Treil | Loire-Atlantique, Francia | Efluentes ganaderos, cultivos de cobertura, ensilados de maíz, subproductos vegetales | 1500 t _{CO2} /a | Invernaderos |
| Cooperativa Speranza | Candiolo, Italia | Subproductos agrícolas y residuos animales | 4000 t _{CO2} /a | Gases industriales e industrias de agua mineral |
| Greenville Energy Ltd | Irlanda del Norte | Residuos de cultivos, desechos alimentarios y efluentes ganaderos | 5 t _{CO2} /día | Hielo seco |
| Proyecto Carbon Harvest (Future Biogas) – en desarrollo, operativo en 2025 | Anglia Oriental, Reino Unido | - | 15000 t _{CO2} /a | Almacenamiento subterráneo en el lecho marino del Mar del Norte |
| Revis Bioenergy – en desarrollo, operativo en 2023 | Cloppenburg, Alemania | Estiércol | 103 t _{CO2} /a | - |
| RENEVO – en desarrollo | Stord, Eldøyane, Noruega | Residuos de salmón y estiércol de ganado | 11 t _{CO2} /día | Usos comerciales como hielo seco |
| Dietikon – en desarrollo | Dietikon, Suiza | Aguas residuales | - | Producción de metano (power-to-gas) |
| Proyecto STORE&GO | Solothurn, Suiza | Aguas residuales | - | - |

3 Fuentes de carbono

Para producir bioetanol, las materias primas se tratan previamente y se hidrolizan. En la hidrólisis, se producen monómeros de azúcar a partir de la celulosa contenida en la biomasa. Estos monómeros de azúcar se convierten posteriormente en etanol, ácidos y gases en un proceso de fermentación en el que intervienen microorganismos como levaduras, hongos o bacterias [54]. El producto de la fermentación se destila finalmente para obtener bioetanol de gran pureza.

En el proceso de fermentación, se producen alrededor de 0,075 t_{CO2} (biogénico) por cada hectolitro de bioetanol [55]. Esto equivale a 0,95 t_{CO2}/t_{bioetanol}⁷.

La captura de CO₂ a partir de la industria de producción de etanol ya es tecnología de última generación en algunos lugares. En Kansas y en Texas, la industria del etanol suministra aproximadamente 270 000 Mt de CO₂ al año para la recuperación mejorada de petróleo (EOR) [56]. La empresa productora de bioetanol POET en EE. UU. inició una asociación con Navigator CO₂ Ventures para capturar CO₂ en diferentes lugares, donde, en total, se producen 5 Mt de CO₂ al año [57].

Además, la combustión del bioetanol como combustible podría utilizarse como fuente de carbono si ocurre en un lugar fijo donde pueda captarse.

Producción de biogás

El biogás se produce durante la digestión anaeróbica de la materia orgánica. Su componente principal es el metano, cuya composición varía entre el 45 %vol. y el 75 %vol. [58], en función de la materia prima y de los parámetros del proceso. El componente restante en el biogás es principalmente CO₂, que es un subproducto en el proceso de digestión y puede obtenerse altamente concentrado después de la purificación del biogás.

Las materias primas adecuadas para la producción de biogás son los residuos de cultivos, el estiércol animal, la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y los lodos de aguas residuales [58].

El CO₂ biogénico puede obtenerse mediante la purificación del biogás, como se ha descrito anteriormente, y mediante su uso como combustible o materia prima en diferentes procesos, por ejemplo, como combustible en una central termoeléctrica. La principal diferencia entre estas dos opciones reside en la concentración de CO₂ obtenida, la cual es considerablemente baja en los gases de combustión (< 10 %) y alta luego del tratamiento del biogás.

El tratamiento del biogás es una tecnología madura y puede llevarse a cabo mediante diferentes métodos tales como la adsorción por oscilación de presión (PSA), lavado

con agua o aminas, membranas y carbonato potásico caliente [51].

La Tabla 3.1 ofrece una descripción general de la captura de CO₂ a partir de centrales de biogás en distintos lugares de Europa, algunas de las cuales están en fase de desarrollo.

3.4. Gestión de residuos y aguas residuales

Los residuos sólidos, líquidos y gaseosos se generan en distintos sectores, como el de la energía, la industria y los hogares. Estos componentes residuales deben ser tratados especialmente para minimizar el impacto ambiental y social.

Residuos sólidos

La composición de los residuos sólidos globales se muestra en la Figura 3.4, el 44 % del ellos corresponde a alimentos y residuos verdes y puede utilizarse como fuente biogénica de carbono (ver sección 3.3).

Las emisiones de CO₂ procedentes de la gestión de residuos sólidos se originan principalmente debido a la recuperación térmica (incineración).

Según la composición de los residuos, por cada tonelada de residuos sólidos urbanos se producen entre 0,7 y 1,7 toneladas de CO₂ [60].

El potencial de captura y utilización de dióxido de carbono a partir de numerosos residuos sólidos, como escorias siderúrgicas, residuos de hormigón, lodos rojos, cenizas volantes y residuos de biomasa ha sido investigado. Estos residuos son prometedores para la producción de materiales de construcción, catalizadores, gas de síntesis y materiales funcionales. Igualmente, se ha estudiado la captura por mineralización de CO₂ utilizando residuos sólidos alcalinos o carbonatación a partir de cenizas volantes, escorias de acero y escorias de carburo [61].

Los residuos sólidos como las cenizas volantes y los residuos de biomasa son particularmente relevantes para el proceso PtX, los cuales se tratan con aminas para capturar CO₂ a temperaturas relativamente bajas. En este contexto, la operación en condiciones de baja presión tiene por objeto facilitar la absorción química y eliminar así la necesidad de un paso adicional de desorción [61].

En las plantas de residuos sólidos urbanos, los residuos pueden quemarse para generar electricidad o calor. El residuo orgánico quemado da lugar a emisiones de CO₂ que pueden capturarse y luego procesarse. Se puede aplicar un proceso de bucle de calcio para capturar el CO₂ de los gases de escape de la central. El suministro de emisiones negativas de CO₂ de una planta equipada de captura de carbono combinada con almacenamiento geológico permite una solución asequible para también proveer calor o energía limpia [62].

⁷ Asumiendo una densidad de bioetanol de 785 kg/m³.

3 Fuentes de carbono

Aguas residuales

A nivel mundial, se genera una cantidad sustancial de aguas residuales (aproximadamente un 30 % de aguas residuales urbanas y un 60 % de aguas residuales industriales). Los países desarrollados logran tratar alrededor del 70 % del flujo de aguas residuales, mientras que los países de bajos ingresos solamente tratan alrededor del 8 % [63].

Las plantas depuradoras de aguas residuales son grandes consumidoras de energía en muchas zonas urbanas y, en consecuencia, contribuyen de forma significativa a las emisiones de gases de efecto invernadero. Además de iniciativas ambiciosas para aumentar la eficiencia energética de las plantas de tratamiento de aguas residuales, existen diversas vías para seguir mitigando las emisiones de CO₂ mediante su captura [63].

El método de captura electrolítica microbiana de carbono (MECC) utiliza aguas residuales como electrolito para la electrolisis del agua asistida por microbios. Los microorganismos, especialmente la bacteria electroactiva (EAB), oxidiza las sustancias biodegradables en aguas residuales a CO₂. Sin embargo, el CO₂ es secuestrado como carbonatos estables, que tiene bajo valor de producto y debe ser químicamente liberado para uso posterior.

Al igual que la MECC, la electrosíntesis microbiana (MES) también aplica EAB, que oxidiza compuestos orgánicos en las aguas residuales. Sin embargo, en lugar de la conversión en carbonatos, las bacterias autótrofas capturan y convierten el CO₂ en compuestos orgánicos de valor agregado (ácido fórmico, ácido propiónico, etanol y butanol [63]). Por el momento, este diseño se enfrenta especialmente a una escasa selectividad para los productos de alto valor.

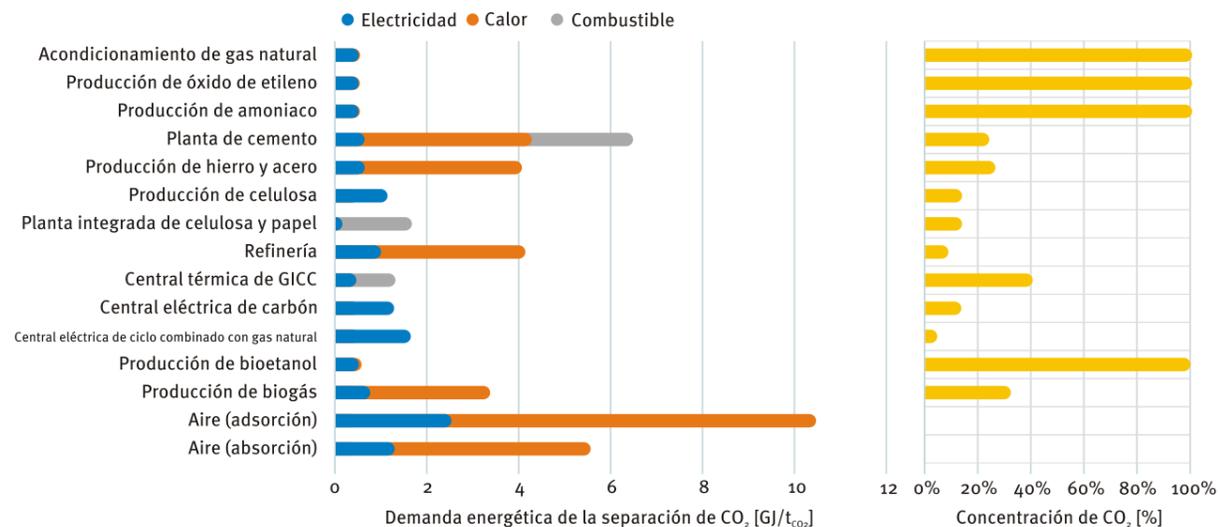


Figura 3.5 Demanda energética y concentración de CO₂ a partir de diferentes fuentes. La concentración de CO₂ en el aire es de 0,04 % y no se ve en las barras con la escala utilizada. Fuente: Ilustración propia según Fröhlich y otros. [65]

Existen diversas soluciones más de captura de CO₂ para las aguas residuales, como por ejemplo el cultivo de microalgas, la producción de biocarbón/biogás y los sistemas de humedales artificiales. Por ejemplo, los lodos de depuradora producidos en el tratamiento de aguas residuales pueden digerirse anaeróbicamente para producir biogás (ver la sección 3.3). Estas iniciativas producen nueva biomasa o compuestos orgánicos, pero actualmente no son adecuados para las rutas clásicas de PtX debido a la falta de escalabilidad.

3.5. Aire atmosférico

La disponibilidad de CO₂ como fuente puntual se limita a las regiones con producción energética e industrial. Otra importante fuente de CO₂ es el aire atmosférico, cuya concentración ha aumentado 47 % desde de la revolución

industrial: de 280 ppm a alrededor de 412 ppm en 2019 [64]. La razón de este aumento es que la cantidad de CO₂ emitida de forma natural y antropogénica es mayor que la extraída de la atmósfera por procesos naturales como la fotosíntesis.

El CO₂ atmosférico puede capturarse mediante la tecnología de captura directa de aire (DAC, ver el capítulo 4.2.1). Utilizar el CO₂ del aire atmosférico para fabricar productos PtX permitiría producirlos en regiones aisladas con buenos recursos energéticos renovables sin necesidad de construir una infraestructura de transporte de gas para el CO₂ o el hidrógeno verde. Además, la captura de CO₂ directamente del aire atmosférico con energías renovables tiene el potencial de crear idealmente un ciclo de carbono cerrado (CCU) o incluso negativo (CCS)

3 Fuentes de carbono

y puede contribuir a reducir los impactos climáticos causados por las emisiones de gases de efecto invernadero.

Sin embargo, la principal desventaja de capturar CO₂ directamente del aire es la enorme cantidad de energía necesaria debido a la baja concentración de CO₂.

3.6. Perspectiva de todas las fuentes de CO₂

Fröhlich y otros [61] resumieron información sobre la demanda energética y la concentración de CO₂ para la separación de diferentes fuentes de CO₂ (ver la Figura 3.5). La demanda energética se divide en electricidad, calor y combustible, en función del tipo de energía necesaria para la separación. La **electricidad** suele utilizarse para la operación de compresores y bombas. El **calor** (principalmente en forma de vapor) es necesario para los procesos de desorción. En algunos procesos, como la producción de cemento, es necesaria una **quema adicional de combustible** en caso de que el calor del proceso no sea suficiente para cubrir la energía necesaria para la separación.

Los procesos de producción de bioetanol, amoníaco y óxido de etileno suministran un flujo de gas de CO₂ altamente concentrado, que solo requiere una pequeña cantidad de energía para el acondicionamiento. Los procesos de combustión en las centrales eléctricas suministran gases de combustión con baja concentración de CO₂, lo que requiere grandes cantidades de energía para la separación. El CO₂ presente en el aire atmosférico es altamente diluido y su separación requiere la mayor

cantidad de energía. No obstante, esta fuente es de fácil acceso independientemente de la ubicación.

Además, la Figura 3.6 muestra los costos nivelados⁸ de la captura de CO₂ para los diferentes sectores en 2019 publicados por la Agencia Internacional de la Energía (IEA). [67]. Los procesos con alta concentración de CO₂, como el acondicionamiento del gas natural, el óxido de etileno, el amoníaco y la producción de bioetanol, presentan los costos más bajos de captura de CO₂. Por otro lado, la captura de CO₂ del aire atmosférico representa la tecnología más costosa. Sin embargo, sigue siendo una fuente importante de CO₂ que puede contribuir a frenar el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera o incluso a reducirla.

Las fuentes puntuales de CO₂ disminuirán considerablemente hasta 2050, como consecuencia de los compromisos de los países para alcanzar las emisiones netas cero al reducir sustancialmente el uso de combustibles fósiles. De acuerdo con estos objetivos, las emisiones de fuentes puntuales restantes consistirán en emisiones de procesos inevitables, emisiones biogénicas y una pequeña parte de emisiones fósiles, que deberían compensarse mediante CCS. Por consiguiente, la DAC irá adquiriendo cada vez más importancia y debería complementar a las fuentes puntuales en el suministro de una fuente fiable de carbono al mercado del PtX. Para lograrlo, el consumo de energía y los costos de separación de la DAC deberían minimizarse.

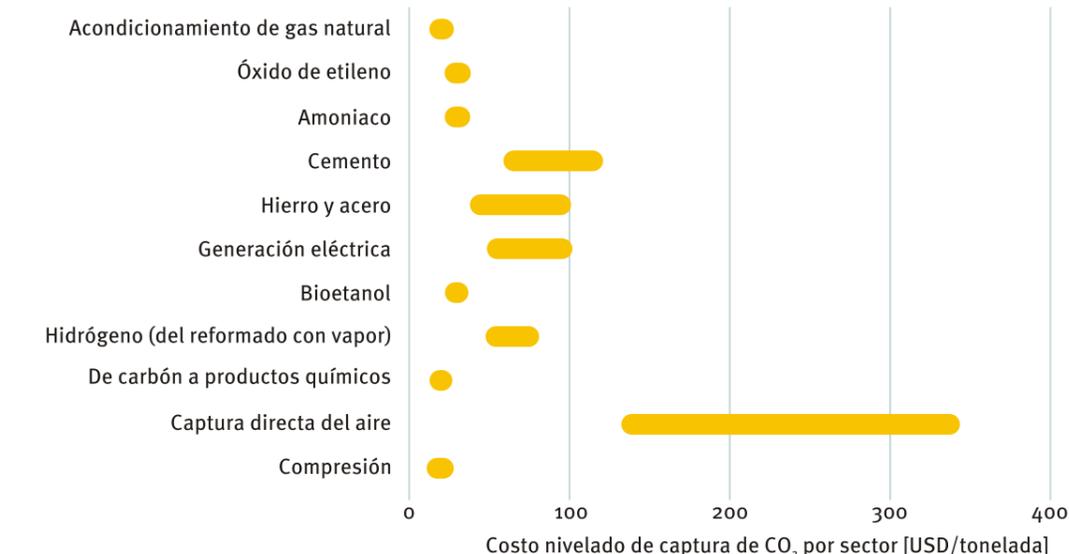


Figura 3.6 Costos nivelados de captura de CO₂ por sector, 2019. Fuente: Ilustración propia según la IEA [66]

⁸ Incluye el capital nivelado, las operaciones sin combustible y los costos de mantenimiento y energía [66].



4 Tecnologías y procesos de captura

Desde la fuente fija original de CO₂ hasta la alimentación real de otros procesos, se requiere un sistema que contenga diversos pasos para la separación, el tratamiento y la utilización del CO₂ (Figura 4.1). La separación del CO₂ de las fuentes puntuales, tales como los gases de combustión, se realiza mediante absorción física y química, adsorción, separación por membrana y otras tecnologías [68].

Se pueden aplicar diversos métodos para la captura de CO₂, según la fuente puntual de CO₂, su calidad y cantidad. Estas tecnologías pueden variar ampliamente en su madurez y en los costos de implementación y operación. Como se muestra en la Figura 4.2, los altos costos para ciertos procesos de captura de CO₂, como por ejemplo la DAC, están principalmente correlacionados con tecnologías no completamente maduras. El nivel de madurez tecnológica (TRL) se refiere al nivel de madurez de la tecnología que va desde 1 (conceptos básicos) a 9 (integración industrial completa). Los procesos más maduros y también asequibles ya se aplican en refinerías o en el sector siderúrgico con procesos de absorción de líquidos y poscombustión.

4.1. Tecnologías de captura

El uso de técnicas de separación en un contexto industrial varía en función de numerosos factores. Parámetros como la identificación de los instrumentos adecuados, su eficiencia y los costos asociados son decisivos. La tecnología dominante para la separación de emisiones de CO₂ es la captura por poscombustión de CO₂ mediante la absorción química con aminas [70]. Los métodos comunes de remoción del CO₂ varían desde tratamientos simples de lavado directo hasta sistemas sofisticados de reciclado. Estos métodos fueron desarrollados inicialmente para el tratamiento del gas natural y la recuperación de H₂ del gas de síntesis. En la actualidad, estos procesos se aplican cada vez más en la captura de CO₂ de numerosas fuentes, como por ejemplo los gases de combustión. Estos flujos de gas con frecuencia contienen diversos contaminantes (agua, nitrógeno, sulfuro de hidrógeno, hidrocarburos, etc.). Adicionalmente, la presencia de oxígeno en la mezcla gaseosa puede conllevar desafíos para sistemas específicos de separación del CO₂. La industria cuenta predominantemente con tecnologías establecidas de remoción de CO₂, que principalmente son la absorción, la adsorción, la separación por membrana y los procesos criogénicos [71]. La elección de la tecnología más adecuada para fuentes específicas de emisiones industriales depende de factores como la composición del gas, las consideraciones económicas y los componentes que se desean separar. La elección de la tecnología más

adecuada para cada caso específico es esencial para optimizar la separación y maximizar la eficiencia [72].



Figura 4.1 Captura y utilización de CO₂ para la producción de PtX.

Con el fin de abordar el tema crítico de la captura de CO₂ y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, se han desarrollado diversas tecnologías de separación. Cada una de ellas tiene sus ventajas y limitaciones, lo que las hace más adecuadas para las diferentes aplicaciones e industrias [72].

4.1.1. Absorción química: tratamiento de gases con aminas

Los procesos de absorción se aplican ampliamente en la industria química y petroquímica para la remoción del CO₂ de los flujos de proceso. Esta tecnología separa el CO₂ de los gases de producto (por ejemplo, hidrógeno, gas de síntesis, gas natural, amoníaco, etc.), lo que garantiza que el gas resultante cumpla con los requisitos del proceso o del producto de manera eficaz [71]. El proceso de absorción se basa en la interacción química o física entre un solvente líquido o una matriz sólida y el soluto de interés, lo que facilita la absorción selectiva del CO₂ sin interactuar con el oxígeno, el nitrógeno u otros componentes del gas de combustión. La solución resultante rica en CO₂ se transfiere a una columna de regeneración, en la que el CO₂ se separa del solvente de forma eficaz, lo que permite reciclar el solvente para un nuevo ciclo de tratamiento de gas [73]. La absorción química es la tecnología más madura de captura de CO₂ (TRL 9) y, en consecuencia, se ha comercializado ampliamente. Esta tecnología se puede incorporar también en plantas existentes. No obstante, se necesitan mejoras debido al alto consumo energético, la baja capacidad de carga del CO₂, la alta tasa de reposición del absorbente y la alta corrosión del equipo [74].

Métodos de separación establecidos

La tecnología de **absorción** se basa en el principio de disolución del CO₂ en un solvente líquido o en un absorbente sólido. Este método se aplica ampliamente en los sistemas de captura por poscombustión, en los que los gases de combustión se tratan para eliminar el CO₂ luego de la combustión. La elección del solvente y las condiciones del proceso juegan un papel significativo en la eficiencia de la captura por absorción [72].

La **adsorción** se basa en la atracción del CO₂ a la superficie de un material adsorbente sólido. Esta tecnología es especialmente relevante en los sistemas de captura por precombustión y poscombustión. La eficiencia de la adsorción depende de la elección del material adsorbente, de las condiciones de operación y de los métodos de regeneración [72].

La tecnología de separación por **membrana** emplea membranas selectivas que permiten el paso del CO₂ mientras retienen otros gases. Este enfoque es muy adecuado para aplicaciones con requisitos de pureza específicos, como por ejemplo la purificación del gas natural y del biogás. La eficiencia de la separación por membrana depende de la selección del material de la membrana y las condiciones de operación [72].

La separación **criogénica** implica el enfriamiento de la mezcla gaseosa a temperaturas muy bajas para condensar y separar el CO₂ de otros componentes. Los procesos criogénicos demandan mucha energía, pero ofrecen alta pureza y eficiencia. Con frecuencia, se usan en aplicaciones de gran escala y son cruciales para la licuefacción del CO₂ para su almacenamiento y transporte [72].

La absorción química incluye una reacción química entre el solvente y el gas disuelto, siendo las alcanolaminas, especialmente la monoetanolamina (MEA), absorbentes reactivos comúnmente usados. Las alcanolaminas son solventes adecuados para la absorción química. Según el grado de sustitución del nitrógeno central (sustitución única, doble y triple), se clasifican en aminas primarias, secundarias y terciarias, respectivamente. Las alcanolaminas tienen al menos un grupo hidroxilo que reduce la presión de vapor y aumenta la solubilidad en agua, y un grupo de aminas que estimula la reacción con los gases ácidos como el CO₂ [75]. Las aminas se usan ampliamente como solventes en tratamientos de gases, porque pueden reaccionar químicamente con el CO₂ para formar una sal y, de ese modo, separar el CO₂ del gas. La absorción ocurre en una columna a 40 – 60 °C, en la que el gas de combustión y el solvente fluyen a contracorriente, resultando en una baja concentración de CO₂ en el gas que sale de la columna. Esta reacción es reversible, y la amina puede regenerarse en el siguiente paso denominado desorción, que ocurre en una segunda columna (separadora) a altas temperaturas de 120 – 140 °C, lo que libera un flujo de gas de CO₂. La solución de aminas luego se puede utilizar de nuevo en la columna de absorción en un proceso cíclico.

También hay procesos físicos de absorción que se basan en solventes con propiedades termodinámicas que favorecen la absorción de CO₂ sobre otros componentes del gas. Los solventes físicos utilizados comúnmente incluyen el metanol (proceso Rectisol) y éteres de glicol (proceso de Selexol). En muchas aplicaciones industriales, las combinaciones de solventes físicos y absorbentes reactivos se utilizan en tándem para optimizar la separación del CO₂ [71].

Un beneficio importante de la absorción química consiste en la posibilidad de reciclado del solvente durante el proceso de absorción dentro del regenerador. Esto reduce los costos de material, en comparación con el reemplazo del solvente luego de cada paso de absorción. Sin embargo, la elección del solvente depende de condiciones específicas. Los solventes líquidos como la MEA son preferibles para presiones parciales bajas de CO₂. Por el contrario, los solventes sólidos como el hidróxido de litio y el circonato de litio son más adecuados para las presiones parciales altas de CO₂, debido a sus capacidades superiores de absorción del CO₂ y a su facilidad de regeneración [73]. La presencia de compuestos sulfúricos en los gases de combustión durante la absorción se suma a las desventajas de estos solventes, ya que fomentan su degradación.

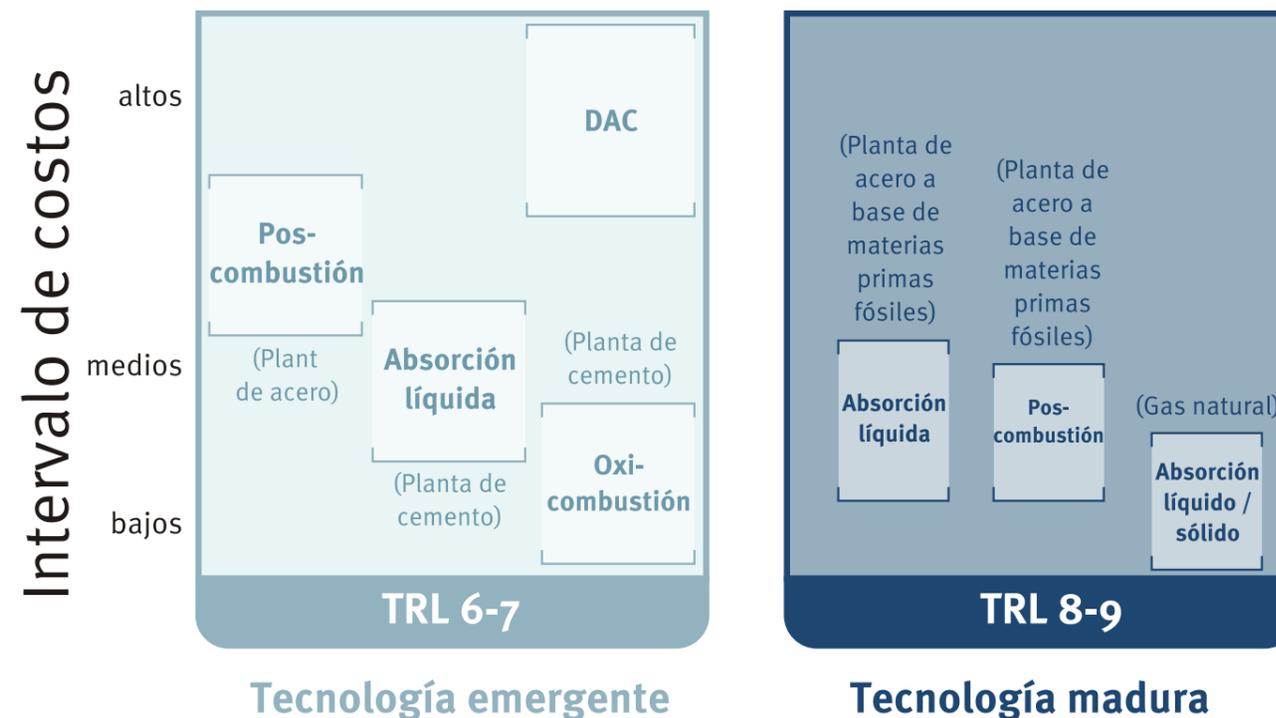


Figura 4.2 TRL y rango de costo para numerosos métodos de captura de CO₂ establecidos y desarrollados [69].

Aproximadamente 3,5 libras de solvente se pierden por cada tonelada de CO₂ separadas, y el solvente perdido precipita en forma de sales que no se disocian en solución. Como consecuencia, se han desarrollado sistemas híbridos, que combinan la absorción con otros procesos para reducir los costos relacionados con el reemplazo del solvente degradado. Los gases traza como el NO_x, gases que contienen sulfuro, el oxígeno y otros se almacenan o se someten a reacciones para neutralizar sus efectos dañinos [73].

La absorción con MEA es una tecnología predominante de captura de CO₂ por poscombustión, la cual consta de dos partes principales: absorción y desorción [72]. La absorción con MEA demuestra la posibilidad de lograr una captura de CO₂ de alto nivel, que, con frecuencia, supera el 90%. Sin embargo, esta afronta diversos desafíos, incluidos la degradación del solvente, la corrosión y la baja eficiencia de regeneración del solvente. Las aminas utilizadas en este proceso son susceptibles de corrosión y degradación por componentes traza, como por ejemplo gases que contienen sulfuro y NO_x. La degradación de solvente por sí sola contribuye de manera significativa a los costos totales de captura de CO₂. La degradación térmica y oxidativa son los mecanismos principales, influenciados por la temperatura, la presión parcial de CO₂ y la presencia de gases de impureza. Además, la

regeneración del solvente requiere una cantidad sustancial de energía, lo que da lugar a altos costos de electricidad y a una eficiencia de generación eléctrica reducida [72]. No obstante, el proceso de absorción con MEA se utiliza ampliamente debido a la eficacia y a los bajos costos de absorción de CO₂ [73].

La MEA, con más de seis décadas de uso en la industria química, sigue siendo un ejemplo destacado, mientras que la investigación en curso explora solventes nuevos que operan con principios similares. La investigación en este método busca una comprensión integral de los mecanismos subyacentes y de la termodinámica con el objetivo de perfeccionar el proceso de absorción, vastamente motivado por su regenerabilidad, un atributo verdaderamente concluyente [73].

Otro método de absorción aplica líquidos iónicos (ILs), que se utilizan principalmente como solventes para la captura de CO₂ en la absorción física debido a sus propiedades solventes, que incluyen volatilidad extremadamente baja, capacidad de solvatación ajustable y alta estabilidad térmica [76].

La exploración de sorbentes sólidos para la absorción de CO₂, como los hidróxidos de calcio y de litio, representa un área importante de interés de la investigación. A pesar de que los sorbentes sólidos suelen asociarse a procesos a altas temperaturas (800 °C para la absorción y 1000 °C

4 Tecnologías y procesos de captura

para la desorción), estos ofrecen la ventaja de velocidades de absorción relativamente rápidas, con posible absorción de hasta el 50% en apenas una hora y una regeneración completa posible de alcanzar en tan solo 15 minutos. No obstante, ciertos desafíos resultan evidentes en pruebas prolongadas, en las que la tasa de absorción tiende a disminuir luego de la hora inicial, lo que se atribuye a la acumulación de CaCO₃ impermeable en la superficie de los lechos compactos. Dada la estabilidad del CaCO₃ como mineral, ese enmascaramiento superficial plantea preocupaciones y podría dar lugar a costos adicionales por la limpieza de las superficies sorbentes [73].

4.1.2. Métodos de adsorción

La adsorción del CO₂ implica una etapa de pretratamiento de la mezcla gaseosa, seguida por el uso de adsorbentes sólidos como carbón activado, zeolitas o estructuras metal-orgánicas. Habitualmente, las cámaras de adsorción múltiple se usan para garantizar la operación continua. Sin embargo, este método tiene limitaciones que incluyen baja selectividad y capacidad de CO₂ en adsorbentes disponibles, eficiencias más bajas de separación en comparación con otras tecnologías y los desafíos relacionados con la regeneración y la reutilización de los adsorbentes [72].

Adsorción por oscilación de presión (PSA)

Este proceso de adsorción se basa en las fuerzas de atracción entre el CO₂ y la superficie del material sorbente. En presencia de gases de combustión que contienen diversos componentes (nitrógeno, CO₂, agua, NO_x, gases que contienen sulfuros, monóxido de carbono, oxígeno), la adsorción puede capturar CO₂ de forma selectiva en condiciones de temperatura y presión específicas. Los sorbentes usados habitualmente incluyen el carbón, el carbono activado, los tamices moleculares y las zeolitas. Dos métodos primarios, la adsorción por oscilación de presión (PSA) y la adsorción por oscilación de temperatura (TSA) se usan para manipular las condiciones de adsorción y desorción. La PSA, conocida por su menor demanda de energía y su mayor velocidad de regeneración, es usualmente la opción preferida. Por otra parte, técnicas innovadoras como la adsorción por oscilación eléctrica demuestran ser prometedoras. En ella, el CO₂ se libera de manera eficaz de un tamiz molecular bajo la influencia de una corriente eléctrica. Este enfoque de adsorción ofrece un medio viable para separar y capturar CO₂ de los gases de combustión y amerita una mayor exploración por su potencial en procesos de captura y secuestro de carbono [73].

La PSA es un proceso de adsorción cíclico para la separación y purificación del gas. El proceso de adsorción se logra, en principio, en el enlace de las moléculas de gas a un adsorbente [77]. El lecho adsorbente se selecciona especialmente en base al gas que debe adsorberse. Este

proceso ocurre únicamente cuando el gas que debe separarse se adsorbe, mientras que los otros gases en la mezcla atraviesan el lecho adsorbente.

Con frecuencia, se usan adsorbentes carbonosos (por ejemplo, el carbono activado o los tamices moleculares de carbono) y adsorbentes oxídicos (por ejemplo, zeolitas). Además, la pureza del gas adsorbido depende no solo del adsorbente utilizado [78]. La temperatura y la presión también son muy influyentes durante el proceso. Como el proceso ocurre en función de la reducción de presión, se utilizan válvulas de control que influyen la calidad del producto.

Otros materiales adsorbentes, como las estructuras metal-orgánicas (MOFs) se pueden aplicar en la PSA. Las MOF son novedosos materiales porosos y cristalinos con una alta capacidad de adsorción, que por ende se usan como sorbentes físicos y químicos, principalmente debido a su gran área superficial, a su funcionalidad química y a la posibilidad de ajustar la forma y el tamaño del poro en función del proceso [79]. Otro material con potencial para adsorber CO₂ son los nanomateriales de carbono, cuya síntesis está siendo investigada, ya que tienen capacidades relativamente altas de adsorción de CO₂. Sin embargo, estos materiales demandan más tiempo y trabajo para su producción, ya que deben sintetizarse en condiciones supervisadas en un laboratorio para un proceso de adsorción específico. En general, la investigación sobre adsorbentes basados en carbono para captura de CO₂ todavía está en etapas iniciales [80].

La PSA tiene muchas ventajas en términos del proceso de captura de carbono. Estas incluyen el potencial de reducir tanto la penalización energética como el impacto ambiental, la menor inversión, costos de operación más bajos, así como menores costos de captura de CO₂ [81]. La PSA es un método innovador y altamente eficiente en recuperar y separar el CO₂ de los gases de proceso como, por ejemplo, flujos de gas de síntesis y gases de acería. En el caso del gas de síntesis, la tecnología de la PSA se utiliza para recuperar CO₂ de flujos de gas de síntesis crudo de alta presión y flujos de gases generados por reformado de metano con vapor o procesos de gasificación [81].

A diferencia de otros métodos de separación que exigen una fluctuación de temperatura alta o el manejo de químicos corrosivos, la adsorción física requiere recipientes capaces de resistir solo cambios leves de temperatura. La regenerabilidad del sorbente en la adsorción por oscilación de presión (PSA), similar a la absorción química, ofrece un enfoque sustentable y asequible, ya que el sorbente puede reutilizarse varias veces para la separación de CO₂. Sin embargo, diversas limitaciones impiden que la adsorción funcione de forma autónoma como una solución de captura de CO₂. En primer

4 Tecnologías y procesos de captura

lugar, el sistema tiene dificultades con el manejo de altas concentraciones de CO₂, como las que habitualmente se encuentran en los gases de combustión de las centrales eléctricas, en las que las concentraciones pueden alcanzar aproximadamente 15 %. En segundo lugar, los sorbentes disponibles carecen de la selectividad deseada para una separación eficaz de CO₂, lo que, con frecuencia permite que moléculas gaseosas de menor tamaño como el N₂ penetren en los poros junto con el CO₂ y reduzcan la eficiencia de la totalidad de la separación. Algunos proyectos de investigación se están llevando a cabo actualmente para desarrollar sorbentes altamente selectivos ajustados para la captura de CO₂. No obstante, la adsorción física parece prometedora dentro de los sistemas híbridos, en donde se puede posicionar de forma estratégica luego de otro proceso de separación para maximizar su eficiencia. La investigación en curso se enfoca en la mejora de la selectividad, la capacidad, las condiciones de operación y las estructuras de empaquetamiento de sorbentes, con el objetivo de transformar la adsorción en un método viable y eficiente de separación de CO₂ en el futuro [73].

De manera significativa, el CO₂ derivado de la producción de hidrógeno a partir del reformado de metano con vapor se separa con el uso de la PSA, en lugar de métodos de absorción tradicionales [71]. A pesar del aumento en la aplicación de los sistemas de PSA para la purificación de hidrógeno, estos producen un flujo de CO₂ derivado con una pureza de tan solo aproximadamente 50 vol.%, lo que hace que sean menos atractivos como fuente comercial de CO₂. Se están haciendo esfuerzos para desarrollar sistemas de PSA capaces de procesar este gas en hidrógeno y flujos ricos en CO₂ [71].

Adsorción por oscilación de presión al vacío (VPSA)

La adsorción por oscilación de presión al vacío, también conocida como VPSA, es el proceso en el que la separación de gases del aire ocurre a través de la descompresión al vacío para la desorción. En otras palabras, las moléculas de gas se enlazan con el material adsorbente a distintas velocidades según la presión. Esto permite que los operadores seleccionen un gas específico de una mezcla de gases. Esta técnica se utiliza, con frecuencia, para producir oxígeno de hasta 95 vol.% a partir del aire [82]. Para ello, a través de un soplador, se fuerza el aire a pasar bajo presión a través del lecho adsorbente. El adsorbente adsorbe nitrógeno, dióxido de carbono y agua en el aire y el resto de los componentes pasan por el adsorbente para ser enriquecidos en oxígeno. Luego, se baja la presión, se desorben el nitrógeno, el dióxido de carbono y el agua y el adsorbente se puede regenerar en el método similar. El proceso recíproco se basa en el principio básico de la generación de oxígeno por adsorción de oscilación de presión al vacío.

La VPSA también se puede aplicar para separar el CO₂ de los gases de combustión. Si la separación se lleva a cabo en una sola etapa, se necesita un nivel de presión bajo para lograr una alta pureza de CO₂. Por este motivo, se está estudiando la VPSA de dos etapas, en las que se pueden utilizar dos adsorbentes diferentes. Las aplicaciones adecuadas para la VPSA son la IGCC, los procesos petroquímicos y siderúrgicos, dado que la presión parcial de CO₂ en los gases de combustión respectivos es alta y los flujos volumétricos son bajos [83].

El proceso de VPSA se lleva a cabo de forma continua con la adsorción selectiva del componente más fuertemente adsorbido y la desorción periódica del extracto a través de la oscilación de presión [84]. El proceso de VPSA depende del adsorbente y de una configuración de ciclo de VPSA eficaz para mejorar la eficiencia de la separación para una mezcla de alimentación [85]. Los adsorbentes se utilizan en función de la selectividad de equilibrio o la selectividad cinética. El carbono activado, el gel de sílice, las zeolitas y las MOF son, en su mayor parte, adsorbentes con equilibrio selectivo. Estos adsorbentes son seleccionados según la diferencia en la cantidad adsorbida en equilibrio en condiciones de proceso a lo largo del curso del ciclo de adsorción-desorción.

En comparación con la PSA, la VPSA ofrece un modo eficiente de desorber el CO₂ del material de tamiz a condiciones de vacío, mientras entrega la pureza más alta de oxígeno [86]. El proceso regenera el material de tamiz al mismo estado en el que inició cada ciclo de lecho de tamiz. Además, la VPSA se caracteriza por su simplicidad, su fiabilidad para separar y sus bajos costos operativos [87].

4.1.3. Separación criogénica

El CO₂ se puede separar de una mezcla de gases mediante un enfriamiento por debajo de su temperatura crítica, en la que se licuifica o se solidifica. Los métodos criogénicos utilizan las distintas propiedades de condensación y desublimación de los componentes gaseosos para lograr niveles excepcionales de recuperación y pureza del CO₂, con frecuencia por encima del 99,99 %. Entre las diversas tecnologías de separación, los métodos criogénicos se destacan por su capacidad para entregar resultados excepcionales en términos de captura de CO₂ [72]. Por lo tanto, la separación criogénica permite la producción directa de CO₂ líquido altamente puro apto para el transporte eficaz a través de ductos o barcos. Sin embargo, este método exige un consumo de energía importante para la refrigeración y necesita la remoción previa de sustancias como agua e hidrocarburos pesados [71]. Dado que la recuperación de CO₂ criogénico se aplica principalmente a flujos con altas concentraciones de CO₂, este método de separación es menos viable para flujos de baja concentración, que son comunes en la mayoría de las fuentes de industriales de emisiones de CO₂. Por lo

4 Tecnologías y procesos de captura

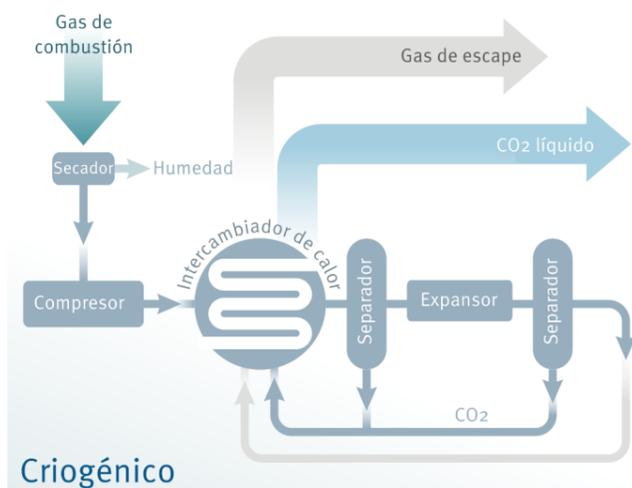


Figura 4.3 Process flow diagram of cryogenic separation

tanto, la separación criogénica de CO₂ se puede aplicar en flujos de gas de alta presión, como aquellos encontrados en los procesos de precombustión y de oxidación. Asimismo, este método se aplica en la producción de etanol a partir de la fermentación, que ofrece un producto de CO₂ líquido notablemente puro [71]. Para el desarrollo de la destilación criogénica de flujos de gas de combustión para obtener CO₂, es necesaria la remoción previa de todos los demás componentes gaseosos y del material particulado. En este proceso, la temperatura y la presión se manipulan para inducir la licuefacción del CO₂, mientras el nitrógeno queda en estado gaseoso [73]. Este proceso se basa en los diferentes puntos de ebullición de los gases en la mezcla que debe separarse, siendo el punto de ebullición del CO₂ -78,5 °C, más alto que el del oxígeno y el del nitrógeno. Esta tecnología ofrece altos niveles de pureza de CO₂ sin el uso de solventes químicos. Sin embargo, se requiere un gran consumo energético y, por ende, presenta altos costos de operación [88].

La separación convencional líquido-vapor utiliza alta presión para evitar la formación de sólidos y daños en el equipo. Con el fin de limitar la demanda energética de este método, es recomendable tener una concentración de CO₂ mayor al 50 % [88]. El proceso de separación criogénica se describe en la Figura 4.3.

4.1.4. Separación por membrana

La separación por membrana es una técnica bien establecida en las industrias de los combustibles y química. Estas membranas existen en distintas variantes, como las de absorción polimérica, cerámica, metálica y de absorción de gas [73]. La ventaja de los procesos de membrana radica en la ausencia de un agente de separación y de cambios de fase, lo que elimina los costos relacionados al proceso. Además, los sistemas de membrana presentan menor huella de carbono, en comparación con los métodos de separación alternativos, y requieren un mantenimiento mínimo. Su diseño

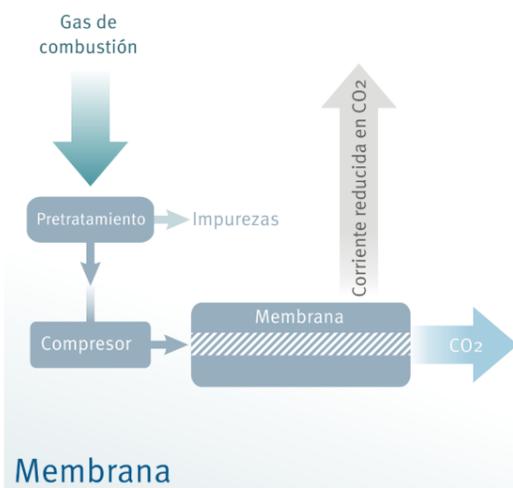


Figura 4.4 Process flow diagram of membrane separation

compacto y liviano permite una ubicación versátil, ya sea en forma horizontal o vertical, lo que las hace particularmente adecuadas para aplicaciones en plantas ya existentes. Asimismo, la naturaleza modular de las unidades de membrana permite una operación multietapa y facilita la transición a gran escala de manera lineal y, por ende, gestiona los costos de manera eficaz [71]. Con pocas partes móviles y una estructura sencilla, los sistemas de separación por membrana son relativamente sencillos de implementar. Aunque se necesita una compresión moderada del gas de combustión antes de la separación, esta compresión demanda considerablemente menos energía que la que se requiere para la PSA. Sin embargo, la tecnología de membrana afronta una proporcionalidad inversa entre la selectividad y la permeabilidad. Las membranas altamente selectivas tienden a mostrar menor permeabilidad, mientras que las membranas permeables pueden permitir el paso de gases no deseados junto con el CO₂, lo que requiere procesos de separación secundarios [73].

Las membranas exigen un control estricto de temperatura y son sensibles a los gases corrosivos (gases que contienen sulfuro, NOx, etc.), lo que requiere un pretratamiento. El mantenimiento del rendimiento de la membrana a lo largo de una operación a largo plazo es desafiante, lo que limita su utilización práctica en la industria. Asimismo, mientras la concentración de CO₂ en el flujo de alimentación se diluye, pueden ser necesarias múltiples etapas y/o el reciclado [72].

En comparación con los métodos convencionales de separación, como la absorción y la adsorción, la separación por membrana se prefiere en la industria debido a sus bajas emisiones de carbono, lo que da lugar a una huella de carbono menor, y debido a su diseño de operación fácil y sencillo. Además, la separación por membrana se puede operar como un sistema de separación continua, mientras que la absorción y la adsorción operan como un sistema discontinuo [89].

4 Tecnologías y procesos de captura

El proceso de separación por membrana se basa en un mecanismo que implica la separación de “forma selectiva” o permeación de los componentes deseados mientras que los demás componentes son retenidos en la membrana. En el caso de las tecnologías de captura de CO₂, el CO₂ se debe separar de los flujos de gas de combustión usando la membrana como el filtro.

En este proceso de separación, las propiedades de la membrana y los parámetros del proceso juegan un papel importante en la determinación del rendimiento total del proceso. Factores como la selectividad y la permeabilidad de la membrana y la relación entre las presiones de la alimentación y del permeado son importantes [90]. La Figura 4.4 representa la separación de CO₂ a través de membranas.

4.1.5. Nuevos proyectos con microalgas y enzimas

La biofijación de CO₂ a través de las microalgas está cobrando fuerza debido a su alta velocidad fotosintética, lo que la hace más eficaz que las plantas terrestres. Este proceso utiliza energía solar y coproduce ingredientes valiosos a partir de la biomasa, como alimentos para consumo humano y para animales, cosméticos, medicamentos y biocombustibles. No obstante, los desafíos incluyen la necesidad de fuentes de nutrientes inorgánicas, requerimientos energéticos intensivos para el cultivo de microalgas, la cosecha, el secado y la baja solubilidad de CO₂ en agua [72].

Otra tecnología novedosa consiste en reemplazar el proceso con aminas por biocatalizadores. Un proceso de captura de carbono enzimático fue desarrollado recientemente y funciona de manera similar a un proceso de poscombustión. El biocatalizador denominado anhidrasa carbónica se emplea en el absorbente. La enzima convierte el CO₂ de mezclas gaseosas en bicarbonato. El fluido de bicarbonato resultante luego se calienta en una columna a temperaturas relativamente bajas (75 °C) para liberar el CO₂ [144].

4.2. Procesos de captura

Las tecnologías de captura de CO₂ consisten en un conjunto de técnicas basadas en los métodos de separación previamente mencionados para separar el CO₂. Este capítulo abarca tecnologías que pueden aplicarse para el posterior uso del CO₂. De este modo, los enfoques de captura de carbono que incluyen medidas de almacenamiento, por ejemplo, BECCS (bioenergía con captura y almacenamiento de carbono) no se describen.

4.2.1. Captura directa del aire

Las tecnologías de captura directa del aire (DAC) separan CO₂ del aire y lo entregan a alta pureza con ayuda de materiales adsorbentes o absorbentes [91]. Esta tecnología, por ende, tiene el potencial de convertirse en una contribución importante a la mitigación global de emisiones de CO₂ [91]. Su desarrollo en curso puede dar lugar a una tecnología madura que no solo elimine el CO₂

del aire, sino que también se pueda desarrollar como una fuente limpia de carbono para aplicaciones PtX. Según la IEA, dieciocho plantas de DAC están operando a nivel global y capturan 0,01 Mt_{CO2} por año [92]. Sin embargo, para alcanzar una escala de gigatoneladas para el 2050, se necesita lograr una tasa de crecimiento anual significativamente alta, de casi 50 % [91, 93] y una escala de producción de 60 Mt_{CO2} por año para 2030 [92].

Antecedentes técnicos

La separación de CO₂ del aire demanda una gran cantidad de energía, ya que el CO₂ representa solo 0,04 % de la composición total del aire atmosférico (421 ppm [94]). Estas son pequeñas cantidades en comparación con las fuentes puntuales de los procesos industriales o de origen biogénico. Por lo tanto, la DAC es una tecnología de captura relativamente costosa debido a la alta demanda energética [92].

Existe una infinidad de posibles procesos optimizados de DAC que están en la actualidad en desarrollo [91]. No obstante, incluso los procesos más maduros de la DAC todavía están en un grado de madurez tecnológica de 6-7 [95] y deben superar la fase piloto y de prueba para su puesta en marcha en una aplicación industrial a gran escala. Existen dos procesos distintos para llevar a cabo la DAC: ya sea con sorbentes sólidos o solventes líquidos (Figura 4.5) [91].

La DAC con sorbentes sólidos (sol-DAC) consta de materiales porosos que pueden separar el CO₂ de un flujo de gas [91]. La sol-DAC opera normalmente a presión ambiental/baja y a temperaturas medias de 80-120 °C [91, 92]. La DAC basada en un solvente líquido (liq-DAC) absorbe el CO₂ gaseoso en una solución básica. Como consecuencia, el CO₂ se enriquece en un flujo líquido [91]. Esta liq-DAC requiere altas temperaturas (300 – 900 °C) para liberar el CO₂ del carbonato de calcio precipitado [92].

Energía

La energía requerida por los dos procesos de DAC (con sorbente sólido y solvente líquido) es relativamente similar. Según un cálculo aproximado, las DAC en operación (sorbente sólido y solvente líquido) utilizan 80 % de energía térmica y 20 % de electricidad [69, 91, 96]. En la sol-DAC, la electricidad se necesita para los ventiladores de contactor [91, 97].

La sol-DAC tiene la ventaja de recibir energía de diversas fuentes de energía sustentable. La fuente se puede ajustar a los requerimientos del sitio de la planta (calor residual, geotérmica, etc.). Dado que la sol-DAC opera a temperaturas de entre 80 y 130 °C, la energía térmica también se puede suministrar a través de una bomba de calor industrial comercial [91, 98]. Al utilizar bombas de calor, la demanda de energía térmica se puede reducir con el uso de energía eléctrica [91].

4 Tecnologías y procesos de captura

En el caso de la liq-DAC, el acceso a las fuentes de energía es más restringido debido a temperaturas de operación más altas de aproximadamente 900 °C [91]. Una temperatura relativamente más alta es necesaria para convertir el CaCO₃ a CaO y CO₂ [91], [99]. En la liq-DAC de gran escala, el calor se provee a través del gas natural y el CO₂ emitido se captura durante la combustión [92]. En la liq-DAC de gran escala, el calor se provee a través del gas natural y el CO₂ emitido se captura durante la combustión [92]. El proceso de Carbon Engineering para la captura de una tonelada de CO₂ tiene un requerimiento energético

equivalente a 8,81 GJ de gas natural, o 5,25 GJ de gas natural junto con 366 kWh de electricidad [91]. Global Thermostat se enfoca en la utilización del calor de proceso para regenerar el sorbente luego de la captura, con vapor a 100 °C - 130 °C, y con un rango preferido de entre 105 °C y 120 °C [100].

DAC de escala comercial

Actualmente están surgiendo muchas empresas nuevas de DAC. Mientras las empresas establecidas como GE [101] centran su desarrollo en sus propias tecnologías de DAC, start-ups como CarbonCapture Inc. [102], [103] emergen

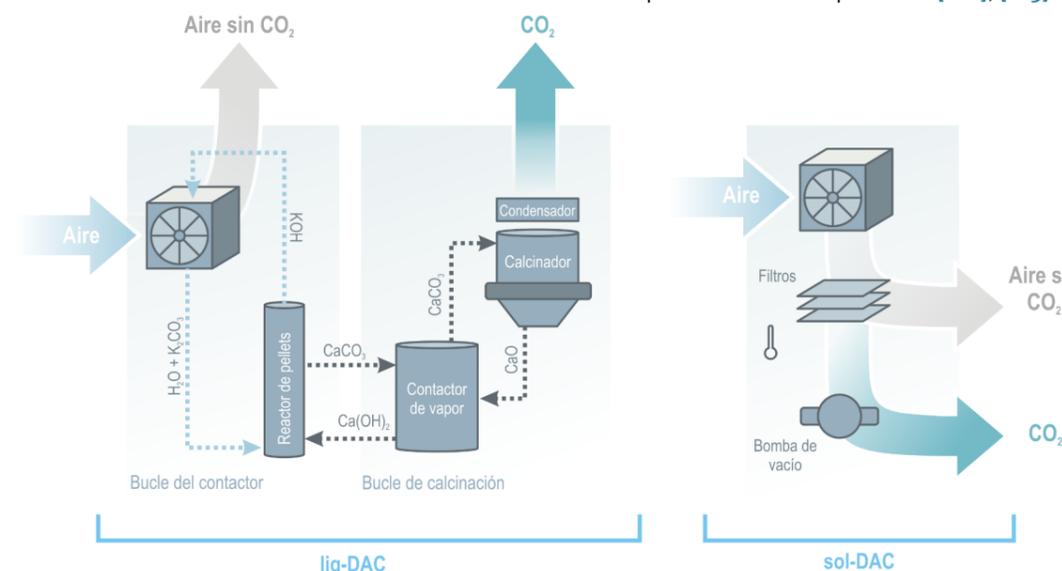


Figura 4.5 Ejemplos de DAC con sorbente líquido (izquierda) y con solvente sólido (derecha).

para brindar créditos para la remoción de carbono. En la actualidad, los principales desarrolladores de la DAC a nivel global son Global Thermostat, Carbon Engineering y Climeworks [91], [97]. Estas empresas presentaron planes ambiciosos para superar la transición de escala piloto a una escala industrial de megatoneladas.

En 2017, Climeworks lanzó su primera planta comercial de DAC, que elimina 900 t de CO₂ por año de la atmósfera y opera en Hinwil, Suiza. La planta de DAC se instaló en una planta de recuperación de residuos (KEZO) y se utiliza calor residual [104].

La construcción de la planta requiere un costo de capital de entre USD 3 y 4 millones [105]. Una nueva planta de DAC denominada Orca captura 4000 t por año (ocho módulos con 500 t_{CO2}/año cada uno), se ubica en Hellisheidi, Islandia y utiliza la energía de una central eléctrica geotérmica [106], [107]. Una segunda planta en Islandia se anunció en 2022, la cual se diseñó con una capacidad de captura de 36000 t_{CO2} por año [91], [108].

Global Thermostat está construyendo dos plantas comerciales de DAC con una capacidad de captura de 2000 t_{CO2} por año cada una [91], [93]. La tecnología de DAC de Global Thermostat utiliza calor residual del proceso para regenerar el sorbente luego de la captura de CO₂.

Global Thermostat anunció una cooperación con Black & Veatch para la construcción de un proyecto de gran escala con una capacidad de 100000 t_{CO2} por año [93], [109]. Este proyecto se sitúa en tres ubicaciones geográficamente separadas en los Estados Unidos (Odessa, Texas; Bucks, Alabama; Goose Creek, Illinois).

La empresa canadiense Carbon Engineering está trabajando en tecnologías comerciales de DAC basadas en un solvente líquido [91]. En la Cuenca Pérmica, Texas, Estados Unidos, Carbon Engineering planea construir su primera planta comercial que captura 1 Mt_{CO2} por año [91], [93], [110]. Esta central debería entrar en funcionamiento a mediados de la década de 2020. Adicionalmente, Carbon Engineering anunció una planta adicional en el noreste de Escocia, Reino Unido, que estará diseñada para capturar de 0,5 a 1 Mt_{CO2} por año [93], [111]. Carbon Engineering calcula costos nivelados de USD 94-232 por tonelada de CO₂ [91], [99].

Escala

En cuanto a escalabilidad, las perspectivas de la DAC pueden variar considerablemente. La sol-DAC es más fácil de desarrollar en pequeña escala, en comparación con la liq-DAC y puede lograr así mayor modularidad. Un ejemplo es la iniciativa de Climeworks, en la que el proceso se

4 Tecnologías y procesos de captura

divide en segmentos con pequeñas unidades que capturan 50 t_{CO2} por año [112], [113]. El competidor Global Thermostat desarrolló, en su primera planta piloto, contenedores como módulos con una capacidad de entre 1000 y 4000 t_{CO2} por año [91], [114]. Estos conceptos modulares ofrecen más flexibilidad en la escala de la planta. El sistema de liq-DAC es mucho más difícil de desarrollar de forma modular pequeña. La propuesta de liq-DAC se basa en un sistema altamente integrado, en el que los procesos enganchados son difíciles de segmentar. Por ende, la menor escala posible es significativamente mayor en comparación con la sol-DAC [91]. Una propuesta de pequeña escala es un reactor de pellets y aire con capacidades mínimas de 10 kt_{CO2} por año [91], [99]. Un beneficio de la liq-DAC es la economía de escala importante debido a los grandes componentes (calcinador, reductor) [91], [99]. La escala óptima, económicamente hablando, es aproximadamente 1 Mt de CO₂ por año [99] y, por lo tanto, es beneficioso para una operación a gran escala [91], [99].

Potencial y perspectiva emergente de la DAC

En los últimos años, diversas empresas descubrieron la DAC como una tecnología para reducir su huella de carbono. Mientras las grandes empresas activas a nivel global invierten en DAC a gran escala, por ejemplo, Microsoft y Climeworks (planta Orca), muchos actores nuevos emergen y participan en el desarrollo de nuevas tecnologías de DAC. Si bien, los proyectos más avanzados permiten una escala industrial futura de DAC, las nuevas tecnologías aún en desarrollo y las tecnologías de DAC de baja TRL pueden mejorar en cuanto a la eficiencia. Ambos caminos tienen el potencial de mejorar la DAC para reducir su demanda de energía y establecer sorbentes optimizados para la producción a gran escala. Diversas empresas start-up se especializan en el desarrollo de sorbentes, contactores de aire y regeneración de baja energía [93]. En particular, los avances en los contactores pasivos de aire y en sorbentes más asequibles se ha convertido en una búsqueda creciente en el campo de las tecnologías de DAC [93]. La investigación en la actualidad indaga materiales y su estructura para aplicaciones de sol-DAC, como estructuras metal-orgánicas (MOF), zeolitas, tamices moleculares de carbono y carbono activado [91]. En la actualidad, la DAC todavía sigue siendo una tecnología que demanda altos costos y mucha energía. Sin embargo, a través de la amplia implementación industrial de la DAC, el costo puede disminuirse y la tecnología por sí misma puede mejorarse más [91]. Por lo tanto, la DAC tiene el potencial de volverse más viable y económica en el futuro de forma exitosa [91]. La DAC se ha desarrollado mucho como una tecnología novedosa y moderna. Sin embargo, para una investigación adicional con plena madurez, se necesitan tanto investigación y desarrollo como inversiones para hacerla más viable a escala industrial.

4.2.2. Estrategias de captura para la quema de combustibles

Dependiendo de si la separación de CO₂ ocurre antes o después del proceso de combustión y de la pureza del oxígeno utilizado, los procesos de captura de CO₂ se pueden categorizar en tres enfoques principales: poscombustión, precombustión y oxicomustión, cada una con sus ventajas y desafíos únicos [72].

La Figura 4.6 ofrece una perspectiva general de estos tres procesos. Estas estrategias de captura de CO₂ juegan un papel crucial en el avance de las tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CCS) y en la reducción del impacto ambiental de la quema de combustibles fósiles. Los investigadores continúan explorando mejoras en la eficiencia y en la rentabilidad con el fin de acelerar la adopción de estos métodos en la lucha contra el cambio climático [72]. Las ventajas y desventajas de los tres procesos de combustión se resumen en la Tabla 4.1.

Precombustión

La precombustión es una estrategia de captura de CO₂ que implica la reacción de un combustible con oxígeno y agua antes de la combustión. Durante este proceso, el carbono en el combustible se convierte en CO₂ y monóxido de carbono, con producción simultánea de hidrógeno. En un paso adicional, el monóxido de carbono se convierte en CO₂ (reacción de desplazamiento del gas de agua), que da lugar a una mezcla gaseosa con aproximadamente 60-80 % de hidrógeno y 20-40 % de CO₂. La captura de precombustión se utiliza principalmente en los sistemas de gasificación integrada en ciclo combinado (IGCC). Una ventaja importante es la producción de H₂, una fuente de energía con diversas aplicaciones, como por ejemplo celdas de combustible, nuevos vehículos con energía e industrias químicas y aeroespaciales [72].

La alta concentración de CO₂ en el gas de síntesis aumenta considerablemente la eficiencia de la adsorción y da lugar a la formación de un combustible que puede ser menos dañino para el ambiente. Asimismo, los investigadores han estudiado y desarrollado ampliamente este método para que su uso en distintas aplicaciones sea posible y eventualmente se comercialice. Es importante advertir sobre las principales desventajas de la captura de precombustión, como el deterioro de los equipos debido a la utilización de combustible rico en hidrógeno y desafíos en cuanto a transferencia de calor [118].

Poscombustión

La captura de carbono por poscombustión es el proceso que implica la captura de CO₂ a baja presión de una mezcla de gases luego de que la combustión se ha completado. Esta tecnología es ampliamente preferida en las centrales eléctricas existentes, y se ha comprobado que recupera CO₂ a una tasa de hasta 800 t/día. La captura de carbono por poscombustión aumenta significativamente la penalización energética y los costos de transporte y almacenamiento debido a la baja concentración de CO₂ en el gas de combustión, que está en el rango de entre

4 Tecnologías y procesos de captura

7 % y 14 % en las centrales con quema de carbón y de menos de 4 % en las centrales con quema de gas. Estos porcentajes son considerablemente menores en comparación al método de captura de carbono por precombustión [42]. Además, esta tecnología implica un costo de producción de electricidad 70 % más alto debido a sus deficiencias. A pesar de esto, las centrales eléctricas todavía implementan esta tecnología de captura carbono en sus proyectos.

La ventaja principal de la tecnología de captura de carbono por poscombustión es su madurez en comparación con las alternativas existentes, ya que existen técnicas estandarizadas para incorporar esta tecnología en diversas aplicaciones industriales. Otra ventaja principal es la facilidad y las relativamente pocas barreras tecnológicas para incorporar esta tecnología en plantas nuevas y existentes. Por otro lado, una desventaja principal es la baja eficiencia en la captura de carbono debido a la baja concentración de CO₂ en el gas de combustión. Otras desventajas incluyen las grandes cargas energéticas para el funcionamiento de luces, motores, bombas, instalaciones auxiliares del campo de pozo, sistemas de control, sistemas de enfriamiento, equipo auxiliar y otras cargas eléctricas que son necesarias para la operación y los altos costos de generación de energía eléctrica [119].

Bucle de calcio

El bucle de calcio se caracteriza por una captura de CO₂ a temperaturas elevadas que usa dos reactores, y utiliza cal

(CaO) como sorbente para formar carbonato de calcio (CaCO₃) a partir de CO₂ en el primer reactor. Luego, el CaCO₃ se transporta al segundo reactor para la regeneración, lo que da lugar a un flujo puro de CO₂ y cal, que luego se recircula al primer reactor. Actualmente, el bucle de calcio sigue estando en etapa piloto/precomercial, y se ha probado en cámaras de combustión con lecho fluidizado con quema de carbón y procesos de fabricación de cemento [115]. Esta iniciativa también se puede combinar con la oxicomcombustión.

Oxicombustión

Este proceso quema combustible con oxígeno puro, lo que da lugar a una alta concentración de CO₂ (más del 80 %) en el gas de combustión. El volumen del gas de combustión de la oxicomcombustión es aproximadamente 75 % menor que el de la combustión con aire [121]. La purificación de CO₂ en la oxicomcombustión es relativamente sencilla en comparación con los métodos de poscombustión, de poscombustión, y las emisiones de NOx son más bajas debido a la falta de nitrógeno. La optimización y la integración de calor son esenciales para minimizar la penalización energética relacionada con las unidades de separación y compresión de aire [72].

Debido a la composición del gas de combustión resultante (principalmente CO₂ y vapor de agua), la deshidratación directa produce un flujo de CO₂ de alta pureza [120]. A pesar de que la separación por oxicomcombustión está en la etapa de prototipo/demostración, ya se ha empleado en la generación eléctrica con quema de carbón y en la

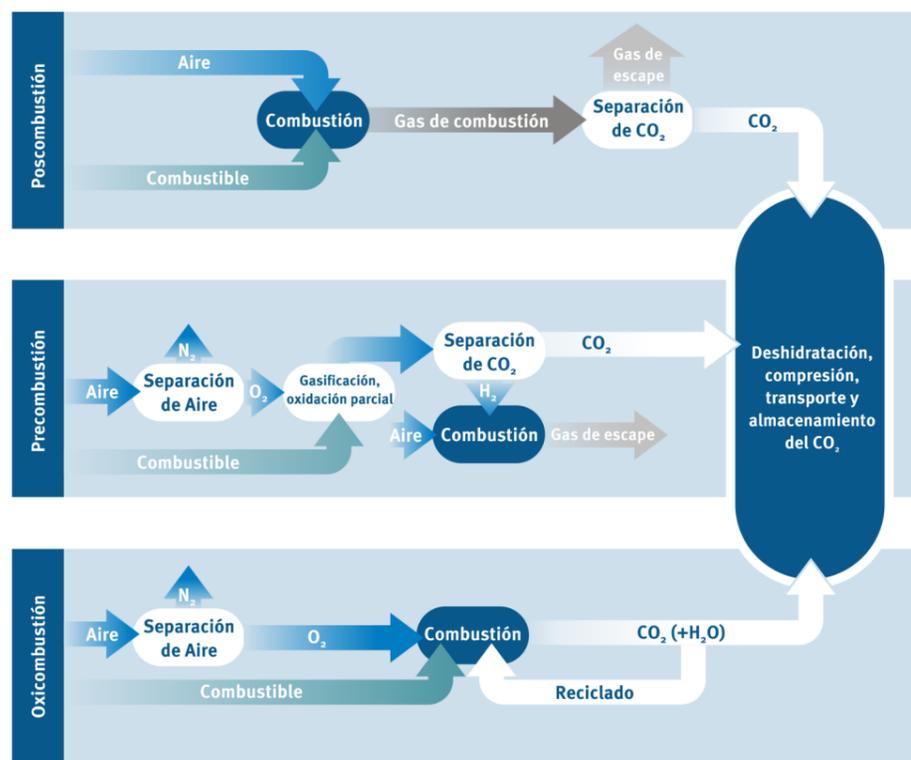


Figura 4.6 Perspectiva general de las iniciativas de captura de CO₂. Fuente: ilustración propia sobre la base de [108]

4 Tecnologías y procesos de captura

Tabla 4.1 Perspectiva general de procesos de combustión

| Proceso | Concentración del CO ₂ (vol%) | Ventajas | Desventajas |
|----------------|--|--|---|
| Pre-combustión | 15% – 50% | <ul style="list-style-type: none"> Mayor eficiencia energética comparado con la poscombustión Menor impacto ambiental | <ul style="list-style-type: none"> Problemas de deterioro Desafíos en la transferencia de calor Únicamente para plantas nuevas |
| Pos-combustión | 3% – 15% | <ul style="list-style-type: none"> Alta madurez Posibilidad de implementación en plantas existentes | <ul style="list-style-type: none"> Baja eficiencia Altos costos de producción de energía |
| Oxi-combustión | ~70% | <ul style="list-style-type: none"> Emisiones de NOx reducidas Alta pureza de CO₂ Menores volúmenes del gas | <ul style="list-style-type: none"> Alta demanda energética Altas temperaturas debido a la combustión en un entorno de oxígeno puro |

producción de cemento. La separación por membrana, basada en membranas poliméricas o inorgánicas con una alta selectividad de CO₂, permite que el CO₂ permee mientras retiene otros gases en el flujo. Su madurez varía según la aplicación: en el procesamiento de gas natural se encuentra en etapa de prueba, y la única separación por membrana a gran escala es operada por Petrobras en Brasil. La tecnología de membrana para la captura de CO₂ del gas de síntesis y del biogás está comercialmente disponible, mientras el desarrollo continúa para el tratamiento de gas de combustión [115].

La oxicomcombustión es una opción muy interesante para la captura de CO₂, debido a la posibilidad de utilizar la tecnología avanzada de vapor, lo que resulta en mayor pureza, menor tamaño y menores costos del equipo y en una central eléctrica con cero emisiones [122]. Las principales ventajas de la oxicomcombustión son la reducción de las emisiones de NOx, la alta pureza del CO₂ y los bajos volúmenes de gas [123]. Actualmente, el proceso de oxicomcombustión se implementa para reducir emisiones de CO₂ aproximadamente un 90 % [124]. Como perspectiva, se están investigando diversas mejoras en los materiales y en los diseños del proceso, para lograr tasas altas de captura, específicamente para la unidad de separación del aire [125].

Los adsorbentes con metales para la oxicomcombustión se utilizan como adsorbentes químicos, y algunos estudios han demostrado mayor rendimiento de captura de CO₂ [126]. Los solventes biomiméticos, como por ejemplo los derivados de la hemoglobina, están siendo estudiados para la absorción avanzada sobre la base de la oxicomcombustión. Los adsorbentes del tamiz molecular de carbono (CMS) se están optimizando para mejorar la captura de carbono a través de la adsorción sobre la base de la oxicomcombustión [127]. Otras iniciativas de oxicomcombustión son el bucle químico y la oxicomcombustión convencional con recirculación.

Combustión química en bucle

La combustión química en bucle (CLC) es una tecnología prometedora para la quema de combustibles fósiles que utiliza el concepto de prevención de la dilución de CO₂ con gases de combustión al evitar el contacto directo entre el gas de combustión y el aire de combustión [128]. En este proceso, el oxígeno necesario para la quema de combustibles se suministra como óxido metálico en una fase sólida. Este proceso requiere portadores de oxígeno como por ejemplo óxidos metálicos de transición como el níquel, el cobre, el cobalto, el acero y los óxidos de manganeso.

En el proceso de combustión química en bucle (CLC), dos lechos fluidizados interconectados se utilizan: el reactor de aire y el reactor de combustible. El combustible gaseoso se alimenta al reactor de combustible, en donde es oxidado por el oxígeno del óxido metálico, que luego se circula entre reactores. La combustión completa en el reactor de combustible produce vapor de agua condensable y CO₂ [129]. Por lo tanto, el CO₂ formado se puede recuperar rápidamente a través de la condensación de vapor de agua, lo que elimina la necesidad de un proceso adicional de separación de CO₂ que demanda mucha energía [129].

El principal beneficio es la separación natural del CO₂ y H₂O de los gases de combustión. El portador de oxígeno reducido es reoxidado en el reactor de aire en ausencia de un combustible a temperaturas relativamente bajas, y esto reduce la formación de NOx porque el combustible se quema en el reactor de combustible en un ambiente sin aire [130].

El bucle químico se ha sometido a prueba a través de aproximadamente 35 proyectos piloto, lo que abarca la quema de carbón, gas, petróleo y biomasa [115].



5 Transporte y almacenamiento

La implementación exitosa de las tecnologías de captura de carbono necesita una infraestructura funcional de CO₂. Las fuentes puntuales de CO₂ no se ubican necesariamente cerca en las instalaciones del comprador. La conexión de las fuentes y los sitios de uso final es, por ende, un objetivo crucial de las plantas PtX. Las capacidades de transporte y almacenamiento deben establecerse para un suministro constante de CO₂. Una infraestructura de CO₂ debe implementar el tratamiento del CO₂ (purificación), la compresión, el transporte, el almacenamiento y, en algunos casos, estaciones de recompresión [69], [131].

Existen dos opciones para el almacenamiento de CO₂: el almacenamiento subterráneo y el almacenamiento superficial en contenedores de gas. Los contenedores de gas se pueden utilizar para almacenar de 180 kg a 60 t de CO₂ [132]. Los almacenamientos subterráneos llegan a capacidades en una escala de Mt a Gt, según las condiciones geológicas [133]. Las áreas típicas son los yacimientos vacíos de petróleo y gas, los acuíferos y las capas profundas de carbón [133]–[135]. Los materiales y el equipamiento para el manejo de CO₂, la conexión al ducto y la inyección se pueden comparar con los componentes establecidos de producción de gas [136].

El transporte de CO₂ ya se ha llevado a cabo durante varias décadas y puede implementarse de forma similar al transporte de gas natural. El transporte de CO₂ gaseoso o líquido a escala industrial puede emplear buques, barcos o ductos [69], [131]. A pequeña escala y a lo largo de distancias cortas, se puede preferir el uso de camiones según las condiciones locales (disponibilidad de carreteras, carriles, etc.). Se calcula que el uso de camiones puede ser factible si las cantidades están por debajo de las 5000 kt_{CO2} por año [69]. Sin embargo, los ductos industriales de CO₂ de gran escala se desarrollan en forma vasta y, en muchos casos, son más viables económicamente en comparación con los alternativos [69], [131]. El transporte marítimo de CO₂ es una opción viable cuando es inevitable cruzar el mar a lo largo de grandes distancias [131]. No obstante, esta opción aún requiere de ductos para conectar las terminales del puerto [131].

Ductos de CO₂

La principal aplicación para el transporte de CO₂ de gran volumen ha sido particularmente para la recuperación mejorada de petróleo (EOR), que se estableció durante más de 40 años [69], [131]. Miles de kilómetros de ductos de CO₂ a través de América del Norte, Europa, Oriente Medio, África y Australia se han utilizado para operaciones

de EOR. Además de la EOR, los ductos de CO₂ también se operan para la utilización de CO₂ (CCU) o captura y almacenamiento de carbono (CCS) [137]. Un nuevo proyecto europeo de CCS cuenta con un ducto de 900 km que transportará CO₂ desde Alemania hasta Noruega [138].

El diseño y la construcción de ductos para el CO₂ seco (bajo contenido de agua) es muy similar a los ductos de gas natural. Al transportar CO₂ con un bajo contenido de agua (~500 ppm), el material de ducto de acero de carbono no genera problemas. Mucho más crítica es la presión operativa que necesita alcanzar, de al menos a 85 bares para el transporte de CO₂, pero la mayoría de los ductos de gas natural operan por debajo de este umbral [131].

Los aspectos críticos del transporte en ductos son las propiedades químicas y físicas del CO₂ [131]. La composición y, por ende, también las propiedades del CO₂ impactan la forma en la que se transporta el este compuesto (gaseoso, líquido o mayormente en su fase supercrítica). Estos parámetros son necesarios para ajustar y mantener las presiones de las respectivas fases. Habitualmente, el CO₂ se transporta como fluido con una alta densidad. Esto es posible en una fase supercrítica. Para garantizar condiciones supercríticas, el CO₂ debe comprimirse a presiones de al menos 73,8 bares y a una temperatura mínima de 31,1 °C. Los parámetros comunes de operación de ductos son 85-150 bares y 12-44 °C (para la fase supercrítica pero también para múltiples fases). Los ductos offshore pueden ser beneficiosos debido a las altas presiones de hasta 300 bares [131].

Las impurezas afectan las propiedades físicas y, por ende, la densidad de fase. Por este motivo, se necesita un diseño ajustado de ductos para la fuente de CO₂ o un tratamiento especial del CO₂ para aumentar su pureza. Las impurezas comunes derivan de la quema de combustibles fósiles o del sector industrial como por ejemplo el cemento o las plantas de acero. En estos casos, el CO₂ puede contener trazas de CO, N₂, O₂, H₂S o agua. También es posible ajustar únicamente la presión durante la operación para garantizar la presión supercrítica y el comportamiento del flujo de la fase fluida [131]. Habitualmente, la pureza del CO₂ en los ductos supera el 95 %, y aproximadamente 1/3 de los ductos entregan una pureza superior a 99 % [137] para garantizar una fase densa y estable. Asimismo, las impurezas pueden ser corrosivas para el material del ducto y conllevar costos de mantenimiento mayores. Un problema principal y muy conocido es la presencia de agua que forma ácido carbónico corrosivo con el CO₂ [131].

5 Transporte y almacenamiento

Las operaciones con altas presiones requieren no solo compresores sino también estaciones de refuerzo intermedias para evitar las caídas de presión según la distancia de transporte [131]. El cambio de fase en operación es evitado a través de un control cuidadoso de los límites de la fase. Los Estados Unidos, que tienen la mayor experiencia en el transporte de CO₂, no han registrado incidentes civiles durante más de 40 años de operación [137].

El tipo de fuente de CO₂, las capacidades de almacenamiento, los sitios de uso final y el ambiente determinan el diseño del ducto. Esto afectará los requisitos, como por ejemplo el largo, el diámetro y las estaciones del compresor.

Costo de infraestructura

Una multiplicidad de parámetros, como por ejemplo las condiciones de seguridad, la estabilidad del terreno y las limitaciones ambientales, pueden dar lugar a diversos resultados para un desarrollo de una infraestructura del CO₂ [131]. El cálculo de los costos totales de una infraestructura del CO₂ es bastante desafiante debido a las variables altamente fluctuantes involucradas. Según la región y los recursos, los casos individuales deben evaluarse. Sin embargo, se pueden definir los parámetros clave que afectan el costo. Existen básicamente dos categorías: costos de almacenamiento y de transporte. Para el almacenamiento, la cantidad define el método de almacenamiento y, por ende, también el costo de implementación y operación. En el caso del transporte, las grandes cantidades son muy asequibles cuando se usan los ductos. Sin embargo, los ductos conllevan altos costos de implementación. La Tabla 5.1 muestra algunos costos de transporte y de almacenamiento de CO₂.

Tabla 5.1 Cálculos de los principales costos de transporte de CO₂ (las cifras pueden variar según las condiciones y las regulaciones del país y, por ende, funcionan como mera indicación) [140]

| Transporte y almacenamiento | Costos |
|--|--|
| Transporte y almacenamiento de CO ₂ | 10 € ₂₀₁₇ / t _{CO2} |
| Transporte y almacenamiento offshore | 14,2 – 32,7 € ₂₀₁₇ / t _{CO2} |
| Transporte del CO ₂ en camión | 0,22 € ₂₀₁₇ / t _{CO2} por km |

Factores clave de costo

Principales factores de costo de almacenamiento [139]:

- Identificación del sitio
- Costos operativos
- Cantidad de CO₂
- Geología del sitio de planta
- Adquisición del componente
- Mano de obra

Principales factores del costo de transporte [139]:

- Distancia
- Cantidad de CO₂
- Tipo de transporte
- Geología según el tipo de transporte
- Costos operativos
- Adquisición del componente
- Mano de obra

6 Conclusiones

6 Conclusiones

La identificación de fuentes de carbono adecuadas y su suministro para numerosas tecnologías de PtX es una contribución crucial para impulsar una transformación industrial hacia la neutralidad climática. Así, el CO₂ como materia prima es de gran importancia para la industria química, el sector energético y el sector de movilidad pesada, para poder reemplazar los recursos fósiles. Diversas fuentes puntuales de CO₂ están disponibles en la actualidad, y el manejo de este gas en una escala industrial no necesita un cambio importante de tecnologías. Sin embargo, no todas las fuentes de carbono se pueden desarrollar de igual forma, ya que diversos factores hacen más favorables algunas fuentes de CO₂. Por lo tanto, la selección de una fuente de CO₂ para una producción de PtX debe considerar diferentes aspectos, como por ejemplo la disponibilidad, el consumo de energía y la sustentabilidad. Para un mejor proceso de toma de decisiones, las regulaciones y la certificación para la selección de una fuente de CO₂ limpia y sustentable son medidas útiles. En particular, una estrategia de gestión de carbono futura podría despejar el camino para un mercado sustentable de CO₂ y el desarrollo de la infraestructura requerida correspondiente.

La captura de carbono de la quema de combustibles fósiles en sectores energéticos e industriales podría ofrecer altas cantidades de CO₂. Sin embargo, este proceso es polémico debido al riesgo de potenciales efectos de lock-in o bloqueo de carbono. La promoción del uso adicional de recursos fósiles podría contradecir las metas de neutralidad de emisiones. Del mismo modo, se espera que en las próximas décadas estas emisiones se reduzcan drásticamente, por lo que ya no estarán disponibles en el mismo orden de magnitud que en la actualidad. Asimismo, la concentración de CO₂ en los gases de combustión es baja, y su separación requiere altas cantidades de energía. Las emisiones de CO₂ inevitables de la industria se consideran una opción adicional para obtener CO₂ para PtX, porque sus emisiones no se pueden evitar con las tecnologías actuales o no existen materiales alternativos para su producto final. Un ejemplo de esto son las emisiones de proceso de la industria del cemento, que parcialmente derivan como producto de una reacción química y no de la combustión.

Las fuentes biogénicas representan una fuente muy aceptada de carbono, porque durante el proceso de crecimiento de la biomasa, se captura CO₂ del aire, lo que crea un ciclo de carbono cerrado. No obstante, debe considerarse que la disponibilidad de biomasa para usos energéticos e industriales está limitada y del mismo modo

lo está el CO₂ biogénico. El uso de CO₂ a partir de la biomasa debe considerar criterios de sustentabilidad, como por ejemplo el ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero, la gestión forestal sustentable, la protección del aire, del suelo y del agua y la protección de la biodiversidad.

El CO₂ del aire atmosférico está disponible en cada región del mundo. No obstante, su baja concentración resulta en una demanda de energía especialmente alta para el proceso de captura con plantas de DAC. La DAC se considera una tecnología limpia, ya que puede operarse con electricidad derivada de energía renovable. Diversas empresas ofrecen módulos comerciales de DAC en distintas escalas. Sin embargo, a la tecnología le falta madurez para una implementación industrial completa. Como ya se mencionó, una desventaja principal es el alto consumo energético que aumenta los costos de operación dramáticamente. Se necesita desarrollo adicional de esta tecnología para reducir sus costos. La futura demanda de CO₂ para la producción de combustibles sintéticos podría ser un motor para el desarrollo de la DAC, debido a la falta de alternativas sustentables y ampliamente escalables.

De manera alternativa, existen numerosos métodos de separación que son aplicables a la mayoría de los procesos que producen CO₂. Una infinidad de métodos ya maduros de separación para diversas tecnologías de captura se aplican en la actualidad en la industria. La absorción y la adsorción son principios que contribuyen a la captura de carbono a través de la precombustión, la poscombustión o la oxicomustión. El tratamiento de gas con aminas y la PSA son tecnologías que usan procesos de absorción y adsorción que están comercialmente disponibles. Otras tecnologías para la captura de carbono incluyen la separación por membrana y criogénica. El proceso de membrana tiene diversas ventajas en comparación con los procesos convencionales, debido a su simplicidad y facilidad de separación, pero su capacidad y estabilidad comercial todavía se están investigando. El proceso criogénico produce CO₂ líquido y no requiere agentes de separación. La separación criogénica podría reducir las emisiones de carbono generadas por centrales eléctricas con quema de combustibles fósiles hasta un 95–99 %, a un costo más bajo y con una demanda de energía menor. Cada tecnología tiene sus propias ventajas y limitaciones. Sin embargo, la fiabilidad, la estabilidad y la eficiencia de separación de estas tecnologías son los principales desafíos. Por ende, se requiere un alto grado de entendimiento de las tecnologías existentes para mejorar su rendimiento y reducir el costo y la energía necesarias

6 Conclusiones

para la separación del CO₂. En la actualidad, se están llevando a cabo trabajos de investigación y desarrollo para mejorar la eficiencia de las tecnologías de captura de carbono.

La captura de carbono por precombustión se destaca como un método altamente eficaz para la extracción de carbono de combustibles fósiles, superando a la tecnología convencional de la poscombustión. El proceso se beneficia de la alta concentración de CO₂ en el gas de síntesis, lo que da lugar a una eficiencia de adsorción mejorada y que resulta en un combustible más limpio con una reducción del impacto ambiental. Los amplios esfuerzos de investigación abarcan el desarrollo y la aplicación de esta tecnología en distintos campos, con el objetivo de alcanzar su eventual comercialización. Sin embargo, se presentan problemas de deterioro en los equipos debido a la utilización de un combustible rico en hidrógeno, los cuales pueden dar lugar a la contaminación de combustible. Adicionalmente, existen desafíos de transferencia de calor en el proceso.

La tecnología de captura de carbono por poscombustión ofrece diversas ventajas clave sobre las alternativas de captura de carbono existentes. Su principal fortaleza radica en su madurez, con técnicas establecidas y disponibles para la integración en diversas aplicaciones industriales, y en el mantenimiento sencillo cuando sea necesario. Asimismo, esta tecnología muestra barreras tecnológicas relativamente bajas, lo que la hace más accesible para las plantas nuevas y para las existentes. Sin embargo, la poscombustión presenta una eficiencia de captura de carbono relativamente baja y conlleva a altos costos de generación de energía eléctrica.

La oxicomustión reduce de forma eficaz las emisiones de CO₂ aproximadamente un 90 %. Sin embargo, este proceso exige una cantidad sustancial de energía y genera temperaturas extremadamente altas debido a la combustión en un ambiente de oxígeno puro. Por esta razón, se necesita un reciclado significativo de gas de combustión para mantener las temperaturas necesarias para el proceso de combustión. Para mejorar los índices de captura, las investigaciones en marcha se enfocan en las mejoras sustanciales y los diseños de proceso, en especial, con foco en las mejoras en la unidad de separación de aire.

La implementación de cadenas completas de valor de PtX no solo se basa en las fuentes viables de carbono sino también en una red adecuada para el transporte de CO₂. El establecimiento de conexiones entre las fuentes y las plantas de producción se vuelve un objetivo crítico para las plantas de PtX, lo que requiere la integración de las capacidades de transporte y almacenamiento para

garantizar un suministro constante de CO₂. Técnicamente, el manejo del CO₂ se puede comparar con el transporte de gas natural y no necesita grandes avances. Tan pronto como se alcancen las cantidades de CO₂ a gran escala, el transporte por ductos se vuelve más viable en comparación con los buques y los camiones. Sin embargo, los cálculos de costos dependen mucho de la distancia, la regulación y las condiciones geológicas.

En general, existen muchas opciones para operar plantas de PtX con numerosas fuentes puntuales de CO₂. Los proyectos piloto y de prueba actuales parcialmente también consideran una mezcla de diferentes fuentes de carbono, por ejemplo, la combinación de CO₂ biogénico y DAC. El CO₂ a partir de fuentes fósiles genera polémica y probablemente servirá solo para la transición hacia fuentes más limpias, ya que estas emisiones también se reducirán para lograr las metas climáticas. Mientras las fuentes biogénicas se limitarán en su capacidad de suministro de gran escala de CO₂, la DAC es una fuente muy costosa debido a la alta demanda energética. Por lo tanto, encontrar fuentes adecuadas de carbono también dependerá mucho de los recursos regionales específicos. Es más probable que las regiones con alto potencial de energías renovables desarrollen DAC, y que las regiones con altos potenciales de biomasa sustentable o procesamiento de residuos apliquen estas fuentes. Sin embargo, las demandas futuras de CO₂ para los productos de PtX como por ejemplo los combustibles sintéticos aumentarán drásticamente. En el corto y mediano plazo, la demanda de CO₂ será escasamente cubierta por la DAC y las fuentes biogénicas únicamente. Por este motivo, el carbón capturado en la industria es necesario para ofrecer cantidades suficientes de CO₂ en las etapas tempranas y en las regiones con capacidades limitadas de energías renovables y fuentes biogénicas. Estas fuentes de carbono también se conectan con menores costos de inversión debido a la amplia disponibilidad de métodos maduros de separación. A largo plazo, como los flujos de gran escala de CO₂ deben transportarse también a lo largo de grandes distancias, se necesitará una red de ductos de CO₂, ya que es la medida más asequible. Por esto, las redes ya existentes de gas natural se pueden usar o incluso reemplazar para reducir el costo de inversión. En consecuencia, una industria emergente de PtX requiere una rápida expansión de energías renovables para impulsar el desarrollo sustentable de CO₂. De forma similar, para el hidrógeno verde, esta iniciativa también podría necesitar estrategias nacionales e internacionales para un plan de gestión de carbono como base para garantizar un suministro constante y sustentable de CO₂ en el futuro.

Literatura

Literatura

- [1] IN4climate.NRW GmbH, "Unavoidable production of CO₂ in a climate neutral primary sector in North Rhine-Westphalia: definition and criteria. A discussion paper by IN4climate.NRW's working group on the carbon dioxide economy," Gelsenkirchen, Sep. 2020. https://www.energy4climate.nrw/fileadmin/Service/Publikationen/Ergebnisse_IN4climate.NRW/2020/in4climatenrw-discussion-paper-unavoidable-production-of-co2-web.pdf
- [2] Alexis Michael Bazzanella and Florian Ausfelder, "Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry," 2017. DEHEMA e.V. https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/Technology_study_Low_carbon_energy_and_feedstock_for_the_European_chemical_industry.pdf
- [3] M.-Y. Lee, K. T. Park, W. Lee, H. Lim, Y. Kwon, and S. Kang, "Current achievements and the future direction of electrochemical CO₂ reduction: A short review," *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 50, no. 8, pp. 769–815, Apr. 2020, doi: 10.1080/10643389.2019.1631991.
- [4] R. Kungas et al., "Commercialization of CO₂ Electrolysis By Haldor Topsoe," *Meet. Abstr.*, vol. MA2021-03, no. 1, pp. 191–191, Jul. 2021, doi: 10.1149/MA2021-031191mtgabs.
- [5] M. Hannon, J. Gimpel, M. Tran, B. Rasala, and S. Mayfield, "Biofuels from algae: challenges and potential," *Biofuels*, vol. 1, no. 5, pp. 763–784, Sep. 2010, doi: 10.4155/bfs.10.44.
- [6] "Decarbonizing industrial processes with solar heat." <https://synhelion.com/solar-heat>
- [7] S. Wijewardane, "Inventions, innovations and new technologies – Solar thermochemical fuels," *Solar Compass*, vol. 2, p. 100024, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.solcom.2022.100024.
- [8] "20 Mio. € Series A Finanzierungsrunde für INERATEC," Jan. 2022. <https://www.ineratec.de/de/series-a-finanzierung-ineratec>
- [9] "Deutschland: Grünes E-Kerosin." <https://www.atmosfair.de/de/klimaschutzprojekte/ptl-e-kerosin/ptl-anlage/>
- [10] Karl Hauptmeier, "NORSK E-FUEL Industrializing PtL for the renewable markets of tomorrow," 2021.
- [11] "ABEL Energy Bell Bay Powerfuels Project," Jun. 2023. <https://research.csiro.au/hyresource/abel-energy-bell-bay-powerfuels-project/>
- [12] "ENGIE and Infinium unveil a partnership to develop an industrial hub on an European scale to produce synthetic fuel in Dunkirk," Feb. 2022. <https://en.newsroom.engie.com/news/engie-and-infinium-unveil-a-partnership-to-develop-an-industrial-hub-on-an-european-scale-to-produce-synthetic-fuel-in-dunkirk-a098-314df.html>
- [13] "The Sailboat CO₂ to Green Methanol Project: Chemical products from recycled CO₂." <https://www.carbonrecycling.is/projects>
- [14] "Selection of announced or already existing production sites." <https://www.efuel-alliance.eu/efuels/efuels-production-map>
- [15] Ram M., Galimova T., Bogdanov D., Fasihi M., Gulagi A., Breyer C., Micheli M., Crone K. (2020). "Powerfuels in a Renewable Energy World - Global volumes, costs, and trading 2030 to 2050". LUT University and Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Lappeenranta, Berlin. ISBN: 978-952-335-551-4
- [16] H. Ritchie, M. Roser, and P. Rosado, "CO₂ and Greenhouse Gas Emissions," Emissions by sector. <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>
- [17] H. Ritchie and M. Rose, "Overview of Global Energy," *Our World in Data*. Accessed: Jan. 13, 2023. <https://ourworldindata.org/energy-overview>
- [18] V. Foster and D. Bedrosyan, "Understanding CO₂ emissions from the global energy sector (English). Live wire knowledge note series; no. 2014/5 Washington, D.C.: World Bank Group." <http://documents.worldbank.org/curated/en/873091468155720710/Understanding-CO2-emissions-from-the-global-energy-sector>
- [19] Global CCS Institute, "CO₂ CAPTURE TECHNOLOGIES - POST COMBUSTION CAPTURE (PCC)." Jan. 2012. <https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/29721/co2-capture-technologies-pcc.pdf>
- [20] IEA, "Industry direct CO₂ emissions in the Sustainable Development Scenario, 2000-2030." <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/industry-direct-co2-emissions-in-the-sustainable-development-scenario-2000-2030>
- [21] IEA, "Chemicals." <https://www.iea.org/reports/chemicals>

Literatura

[22] H.A. Haugen, N.H. Eldrup, A.M. Fatnes, and E. Leren, “Commercial Capture and Transport of CO₂ from Production of Ammonia,” *Energy Procedia*, vol. 114, pp. 6133–6140, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.1750.

[23] HeidelbergCement, “How cement is made.” Accessed: Oct. 11, 2022. <https://www.heidelbergmaterials.com/en/how-cement-is-made>

[24] M. Fischedick et al., “Industry,” in *Climate change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014, pp. 739–810. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_chapter10.pdf

[25] M. Lord, *Rethinking Cement*. Fitzroy, Victoria: Beyond Zero Emissions, 2017. <https://bze.org.au/wp-content/uploads/2020/12/rethinking-cement-bze-report-2017.pdf>

[26] T. Hills, D. Leeson, N. Florin, and P. Fennell, “Carbon Capture in the Cement Industry: Technologies, Progress, and Retrofitting,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 50, no. 1, pp. 368–377, Jan. 2016, doi: 10.1021/acs.est.5b03508.

[27] Heidelberg Materials, “Carbon Capture and Storage (CCS),” The Brevik CCS project. <https://www.heidelbergmaterials.com/en/carbon-capture-and-storage-ccs>

[28] Heidelberg Materials, “HeidelbergCement and partners drive innovative CO₂ separation.” <https://www.heidelbergmaterials.com/en/pr-30-03-2020>

[29] HeidelbergCement, “Groundbreaking Technologies: CCU/S – Carbon Capture, Utilisation and Storage.” <https://www.heidelbergmaterials.com/en/carbon-capture-and-storage-ccs>

[30] M. Suhret al., Best Available Techniques (BAT) reference document for the production of pulp, paper and board. Luxembourg: Publications Office, 2015.

[31] Statista, “Production volume of paper and paperboard worldwide from 2010 to 2021, by type.” <https://www.statista.com/statistics/270317/production-volume-of-paper-by-type/>

[32] WWF, “Pulp and Paper - Overview.” <https://www.worldwildlife.org/industries/pulp-and-paper>

[33] E. Svensson, H. Wiertzema, and S. Harvey, “Potential for Negative Emissions by Carbon Capture and Storage From a Novel Electric Plasma

Calcination Process for Pulp and Paper Mills,” *Front. Clim.*, vol. 3, p. 705032, Oct. 2021, doi: 10.3389/fclim.2021.705032.

[34] IEA, “Pulp and Paper,” *Pulp and Paper* <https://www.iea.org/reports/pulp-and-paper>

[35] SAIPEM, “Carbon Capture- Showcase.” <https://www.saipem.com/en/solutions/renewables/carbon-capture/showcase>

[36] MELFAB Engineering, “The Six Steps of Modern Steel Manufacturing.” <https://www.melfab.com.au/the-six-steps-of-modern-steel-manufacturing/>

[37] Sunflag Iron & Steel Co. Ltd., “The 5 Steps of Steel Manufacturing and Production.” <https://sunflagsteel.com/the-5-steps-of-steel-manufacturing-and-production/>

[38] B. Quayle and A. de Berker, “Understand your steel emissions,” *Carbon Chain*. <https://www.carbonchain.com/blog/understand-your-steel-emissions>

[39] IEA, “Iron and Steel Technology Roadmap,” Paris, Oct. 2020. <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>

[40] S. Roudier, L. Delgado Sancho, M. A. Aguado-Monsonet, and R. Remus, Best available techniques (BAT) reference document for iron and steel production: industrial emissions Directive 2010/75/EU: integrated pollution prevention and control. Luxembourg: Publications Office, 2013.

[41] Fraunhofer UMSICHT, “Make steel production more climate-friendly.” <https://www.umsicht.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2023/methanol-production-with-metallurgical-gases.html>

[43] ArcelorMittal, “Carbon capture in the steel industry: ArcelorMittal, Mitsubishi Heavy Industries Engineering, BHP and Mitsubishi Development sign collaboration agreement.” <https://corporate.arcelormittal.com/media/news-articles/carbon-capture-in-the-steel-industry-arcelormittal-mitsubishi-heavy-industries-engineering-bhp-and-mitsubishi-development-sign-collaboration-agreement>

[44] UC RUSAL, “How aluminium is produced.” <https://www.aluminiumleader.com/production/how-aluminium-is-produced/>

[45] Hydro, “How is aluminium made?” https://www.hydro.com/en-DE/aluminium/about-aluminium/how-its-made/?gclid=EAlaIqobChMlwpzHoKTNgQMVVjsGABoK2AFBEAAYASAAEgJQ4PD_BwE

Literatura

[46] Mission Possible Partnership, “Closing the gap for aluminium emissions: technologies to accelerate deep decarbonization of direct emissions,” Dec. 2021. <https://missionpossiblepartnership.org/wp-content/uploads/2021/12/Closing-the-Gap-for-Aluminium-Emissions.pdf>

[47] L. Delgado Sancho, A. Q. Sissa, B. M. Scalet, S. Roudier, and M. García Muñoz, Best available techniques (BAT) reference document for the manufacture of glass: industrial emissions Directive 2010/75/EU: integrated pollution prevention and control. Luxembourg: Publications Office, 2013.

[48] “Glass is the hidden gem in a carbon-neutral future,” *Nature*, vol. 599, no. 7883, pp. 7–8, Nov. 2021, doi: 10.1038/d41586-021-02992-8.

[49] European Climate Infrastructure and Environment Executive Agency, “How LIFE is reducing emissions from glass production.” https://cinea.ec.europa.eu/news-events/news/how-life-reducing-emissions-glass-production-2022-03-16_en#:~:text=Demand%20is%20rising%20due%20to,million%20tonnes%20worldwide%20each%20year.

[50] Glass Futures, “Glass Futures partners with C-Capture on project awarded £1.7m in BEIS funding to demonstrate feasibility of next generation, low-cost carbon capture solutions in hard-to-decarbonise industries.” <https://www.glass-futures.org/glass-futures-partners-with-c-capture-on-awarded-1-7m-in-beis-funding-to-demonstrate-feasibility-of-next-generation-low-cost-carbon-capture-solutions-in-hard-to-decarbonise-industries>

[51] European Biogas Association (EBA), “BIOGENIC CO₂ FROM THE BIOGAS INDUSTRY,” 2022. https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2022/10/Biogenic-CO2-from-the-biogas-industry_Sept2022-1.pdf

[52] T. Mai-Moulin, R. Hoefnagels, P. Grundmann, and M. Junginger, “Effective sustainability criteria for bioenergy: Towards the implementation of the European renewable directive II,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 138, p. 110645, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110645.

[53] O. Olsson et al., “Deployment of BECCS/U value chains - Technological pathways, policy options and business models,” *IEA Bioenergy*, Jun. 2020. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/06/Deployment-of-BECCS-Value-Chains-IEA-Bioenergy-Task-40.pdf>

[54] I. Edeh, “Bioethanol Production: An Overview,” in *Bioethanol Technologies*, F. Inambao, Ed., IntechOpen, 2021. doi: 10.5772/intechopen.94895.

[55] A. Laude, O. Ricci, G. Bureau, J. Royer-Adnot, and A. Fabbri, “CO₂ capture and storage from a bioethanol plant: Carbon and energy footprint and economic assessment,” *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 5, no. 5, pp. 1220–1231, Sep. 2011, doi: 10.1016/j.ijggc.2011.06.004.

[56] State CO₂-EOR Deployment Work Group, “Capturing and Utilizing CO₂ from Ethanol: Adding Economic Value and Jobs to Rural Economies and Communities While Reducing Emissions,” Dec. 2017. https://www.kgs.ku.edu/PRS/ICKan/2018/March/WhitePaper_EthanolCO2Capture_Dec2017_Final2.pdf

[57] POET, “Carbon Capture.” <https://poet.com/carboncapture/>

[58] IEA, “Outlook for biogas and biomethane: Prospects for organic growth.” <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth>

[59] The World Bank, “Trends in Solid Waste Management.” Accessed: Jun. 16, 2023. https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html

[60] Environment Agency, “Pollution inventory reporting – incineration activities guidance note,” Bristol, Feb. 2020. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/923125/Pollution-inventory-reporting-incineration-activities-guidance-note.pdf

[61] W.-H. Xie, H. Li, M. Yang, L.-N. He, and H.-R. Li, “CO₂ capture and utilization with solid waste,” *Green Chemical Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 199–209, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.gce.2022.01.002.

[62] M. Haaf, R. Anantharaman, S. Roussanaly, J. Ströhle, and B. Eppler, “CO₂ capture from waste-to-energy plants: Techno-economic assessment of novel integration concepts of calcium looping technology,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 162, p. 104973, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104973.

[63] L. Lu, J. S. Guest, C. A. Peters, X. Zhu, G. H. Rau, and Z. J. Ren, “Wastewater treatment for carbon capture and utilization,” *Nat Sustain*, vol. 1, no. 12, pp. 750–758, Dec. 2018, doi: 10.1038/s41893-018-0187-9.

[64] A. Buis, “The Atmosphere: Getting a Handle on Carbon Dioxide.” Accessed: Sep. 28, 2022. <https://climate.nasa.gov/news/2915/the-atmosphere-getting-a-handle-on-carbon-dioxide/>

Literatura

- [65] T. Fröhlich, S. Blömer, D. Münter, and L.-A. Brischke, "CO₂-Quellen für die PtX-Herstellung in Deutschland - Technologien, Umweltwirkung, Verfügbarkeit," Heidelberg, 2019.
https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/ifeu_paper_03_2019_CO2-Quellen-f%C3%BCr-PtX.pdf
- [66] D. W. Keith, G. Holmes, D. St. Angelo, and K. Heidel, "A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere," *Joule*, vol. 2, no. 8, pp. 1573–1594, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.joule.2018.05.006.
- [67] IEA, "Levelised cost of CO₂ capture by sector and initial CO₂ concentration, 2019."
<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/levelised-cost-of-co2-capture-by-sector-and-initial-co2-concentration-2019>
- [68] J. Podder, B. R. Patra, F. Pattnaik, S. Nanda, and A. K. Dalai, "A Review of Carbon Capture and Valorization Technologies," *Energies*, vol. 16, no. 6, p. 2589, Mar. 2023, doi: 10.3390/en16062589.
- [69] F. Kazemifar, "A review of technologies for carbon capture, sequestration, and utilization: Cost, capacity, and technology readiness," *Greenhouse Gases*, vol. 12, no. 1, pp. 200–230, Feb. 2022, doi: 10.1002/ghg.2131.
- [70] ROBERT CZARNOŃA, EWA KNAPIK, PAWEŁ WOJNAROWSKI, DAMIAN JANIGA, and JERZY STOPA, "Carbon Dioxide Separation Technologies," *Archives of Mining Sciences*, Jul. 2023, doi: 10.24425/ams.2019.129364.
- [71] J. A. Ritter and A. D. Ebner, "Carbon Dioxide Separation Technology R&D Needs for the Chemical and Petrochemical Industries," Nov. 2007.
- [72] C. Song, Q. Liu, S. Deng, H. Li, and Y. Kitamura, "Cryogenic-based CO₂ capture technologies: State-of-the-art developments and current challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 101, pp. 265–278, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2018.11.018.
- [73] D. Aaron and C. Tsouris, "Separation of CO₂ from Flue Gas: A Review," *Separation Science and Technology*, vol. 40, no. 1–3, pp. 321–348, Feb. 2005, doi: 10.1081/SS-200042244.
- [74] C.-H. Yu, C.-H. Huang, and C.-S. Tan, "A Review of CO₂ Capture by Absorption and Adsorption," *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 12, no. 5, pp. 745–769, 2012, doi: 10.4209/aaqr.2012.05.0132.
- [75] F. Vega, M. Cano, S. Camino, L. M. G. Fernández, E. Portillo, and B. Navarrete, "Solvents for Carbon Dioxide Capture," in *Carbon Dioxide Chemistry, Capture and Oil Recovery*, I. Karamé, J. Shaya, and H. Srour, Eds., InTech, 2018. doi: 10.5772/intechopen.71443.
- [76] J. De Riva, J. Suarez-Reyes, D. Moreno, I. Díaz, V. Ferro, and J. Palomar, "Ionic liquids for post-combustion CO₂ capture by physical absorption: Thermodynamic, kinetic and process analysis," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 61, pp. 61–70, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.ijggc.2017.03.019.

- [77] Samson, "Pressure Swing Adsorption."
<https://usa.samsungroup.com/en/products-applications/solutions/pressure-swing-adsorption/>
- [78] J. Zhang, P. A. Webley, and P. Xiao, "Effect of process parameters on power requirements of vacuum swing adsorption technology for CO₂ capture from flue gas," *Energy Conversion and Management*, vol. 49, no. 2, pp. 346–356, Feb. 2008, doi: 10.1016/j.enconman.2007.06.007.
- [79] P. Puthiaraj, Y.-R. Lee, S. Ravi, S. Zhang, and W.-S. Ahn, "Metal–Organic Framework (MOF)-based CO₂ Adsorbents," in *Post-combustion Carbon Dioxide Capture Materials*, Q. Wang, Ed., The Royal Society of Chemistry, 2018, pp. 153–205. doi: 10.1039/9781788013352-00153.
- [80] A. E. Creamer and B. Gao, "Carbon-Based Adsorbents for Postcombustion CO₂ Capture: A Critical Review," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 50, no. 14, pp. 7276–7289, Jul. 2016, doi: 10.1021/acs.est.6b00627.
- [81] Linde, "PSA Pressure Swing Adsorption Plants."
https://www.linde-engineering.com/en/images/HA%20_1_1_e_12_150dpi_NB_tcm19-4468.pdf
- [82] Linde, "Oxygen generation by Vacuum Pressure Swing Adsorption." Accessed: Aug. 10, 2023.
https://www.linde-engineering.com/en/images/Oxygen%20generation.%20By%20Vacuum%20Pressure%20Swing%20Adsorption._tcm19-416454.pdf
- [83] M. Bui et al., "Carbon capture and storage (CCS): the way forward," *Energy Environ. Sci.*, vol. 11, no. 5, pp. 1062–1176, 2018, doi: 10.1039/C7EE02342A.
- [84] G.-G. Börger, "Adsorption aus der Gasphase. Ingenieurwissenschaftliche Grundlagen und Technische Verfahren. Von W. Kast. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim 1988. XV, 279 S., geb. DM 220.00. – ISBN 3-527-26719-0," *Angew. Chem.*, vol. 101, no. 5, pp. 650–651, May 1989, doi: 10.1002/ange.19891010533.
- [85] S. C. J. Van Acht et al., "Optimization of VPSA-EHP/C process for high-pressure hydrogen recovery from Coke Oven Gas using CO selective adsorbent," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 1, pp. 709–725, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.10.005.
- [86] D. Ferreira, P. Bárca, R. D. Whitley, and A. Mendes, "Single-Stage Vacuum Pressure Swing Adsorption for Producing High-Purity Oxygen from Air," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 54, no. 39, pp. 9591–9604, Oct. 2015, doi: 10.1021/acs.iecr.5b02151.
- [87] Z. Qian, Y. Yang, P. Li, J. Wang, and A. E. Rodrigues, "An improved vacuum pressure swing adsorption process with the simulated moving bed operation mode for CH₄/N₂ separation to produce high-purity methane," *Chemical Engineering Journal*, vol. 419, p. 129657, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.cej.2021.129657.

Literatura

- [88] C. Font-Palma, D. Cann, and C. Udemu, "Review of Cryogenic Carbon Capture Innovations and Their Potential Applications," *C*, vol. 7, no. 3, p. 58, Jul. 2021, doi: 10.3390/c7030058.
- [89] G. Ji and M. Zhao, "Membrane Separation Technology in Carbon Capture," in *Recent Advances in Carbon Capture and Storage*, Y. Yun, Ed., InTech, 2017. doi: 10.5772/65723.
- [90] R. Singh, "Introduction to membrane technology," in *Hybrid Membrane Systems for Water Purification*, Elsevier, 2005, pp. 1–56. doi: 10.1016/B978-185617442-8/50002-6.
- [91] N. McQueen, K. V. Gomes, C. McCormick, K. Blumanthal, M. Pisciotta, and J. Wilcox, "A review of direct air capture (DAC): scaling up commercial technologies and innovating for the future," *Prog. Energy*, vol. 3, no. 3, p. 032001, Jul. 2021, doi: 10.1088/2516-1083/abf1ce.
- [92] Budinis, Sara, "Direct Air Capture," IEA, Paris, Tracking Report, Sep. 2022.
<https://www.iea.org/reports/direct-air-capture>
- [93] M. Ozkan, S. P. Nayak, A. D. Ruiz, and W. Jiang, "Current status and pillars of direct air capture technologies," *iScience*, vol. 25, no. 4, p. 103990, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.isci.2022.103990.
- [94] "National Oceanic and Atmospheric Administration, Global Monitoring Laboratory."
https://gml.noaa.gov/webdata/ccgg/trends/co2/co2_mm_mlo.txt
- [95] Z. Zolfaghari, A. Aslani, A. Moshari, and M. Malekli, "Direct air capture from demonstration to commercialization stage: A bibliometric analysis," *Intl J of Energy Research*, vol. 46, no. 1, pp. 383–396, Jan. 2022, doi: 10.1002/er.7203.
- [96] N. McQueen et al., "Cost Analysis of Direct Air Capture and Sequestration Coupled to Low-Carbon Thermal Energy in the United States," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 54, no. 12, pp. 7542–7551, Jun. 2020, doi: 10.1021/acs.est.0c00476.
- [97] Committee on Developing a Research Agenda for Carbon Dioxide Removal and Reliable Sequestration et al., *Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda*. Washington, D.C.: National Academies Press, 2019, p. 25259. doi: 10.17226/25259.
- [98] C. Arpagaus, F. Bless, M. Uhlmann, J. Schiffmann, and S. S. Bertsch, "High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials," *Energy*, vol. 152, pp. 985–1010, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.03.166.
- [99] D. W. Keith, G. Holmes, D. St. Angelo, and K. Heidel, "A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere," *Joule*, vol. 2, no. 8, pp. 1573–1594, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.joule.2018.05.006.

- [100] "System and Method for Carbon Dioxide Capture and Sequestration"
<https://patents.justia.com/patent/20200009504>
- [101] "GE Successfully Demonstrates Scalable Direct Air Capture System for CO₂ Removal," Mar. 2023.
<https://www.ge.com/research/newsroom/ge-successfully-demonstrates-scalable-direct-air-capture-system-co2-removal>
- [102] "Microsoft inks another deal to capture and store its carbon emissions underground," Mar. 2023.
<https://www.theverge.com/2023/3/22/23651587/microsoft-climate-tech-startup-carbon-capture-wyoming>
- [103] "Carbon Capture Inc. to Supply Microsoft Carbon Removal Credits Based on Direct Air Capture Technology," Mar. 2023.
<https://www.businesswire.com/news/home/20230322005154/en/Carbon-Capture-Inc.-to-Supply-Microsoft-Carbon-Removal-Credits-Based-on-Direct-Air-Capture-Technology>
- [104] "Climeworks unveils the world's first commercial direct air capture plant," May 2017.
<https://climeworks.com/news/today-climeworks-is-unveiling-its-proudest-achievement>
- [105] S. Evans, "On the roof of a waste incinerator outside Zurich, the Swiss firm Climeworks has built the world's first commercial plant to suck CO₂ directly from the air.," Jun. 2017.
<https://www.carbonbrief.org/swiss-company-hoping-capture-1-global-co2-emissions-2025/>
- [106] "From vision to reality: Orca is launched."
<https://climeworks.com/roadmap/orca>
- [107] "The rapid construction of Climeworks' new direct air capture and storage plant Orca has started," Dec. 2020. <https://climeworks.com/news/climeworks-makes-large-scale-carbon-dioxide-removal-a-reality>
- [108] "Mammoth: our newest facility."
<https://climeworks.com/roadmap/mammoth>
- [109] "Black & Veatch Awarded Federal Funding to Advance Direct Air Capture Technology," Jul. 2021.
<https://www.bv.com/news/black-veatch-awarded-federal-funding-advance-direct-air-capture-technology>
- [110] "Occidental, 1PointFive to Begin Construction of World's Largest Direct Air Capture Plant in the Texas Permian Basin," Aug. 2022.
<https://carbonengineering.com/news-updates/construction-direct-air-capture-texas/>

Literatura

- [111] "Engineering begins on UK's first large-scale facility that captures carbon dioxide out of the atmosphere," Jun. 2021. <https://carbonengineering.com/news-updates/uks-first-large-scale-dac-facility/>
- [112] C. Beuttler, L. Charles, and J. Wurzbacher, "The Role of Direct Air Capture in Mitigation of Anthropogenic Greenhouse Gas Emissions," *Front. Clim.*, vol. 1, p. 10, Nov. 2019, doi: 10.3389/fclim.2019.00010.
- [113] J. Tollefson, "Sucking carbon dioxide from air is cheaper than scientists thought," *Nature*, vol. 558, no. 7709, pp. 173–173, Jun. 2018, doi: 10.1038/d41586-018-05357-w.
- [114] "Dr. Chichilnisky Gives Talk on Carbon Negative Power Plants and Their Impact on Environment – Puerto Madryn, Argentina 10/23," Oct. 23, 2018. <https://chichilnisky.com/news/dr-chichilnisky-gives-talk-on-carbon-negative-power-plants-and-their-impact-on-environment-puerto-madryn-argentina-10-23/>
- [115] IEA, "About CCUS," Apr. 2021. <https://www.iea.org/reports/about-ccus>
- [116] B. Metz and Intergovernmental Panel on Climate Change, Eds., IPCC special report on carbon dioxide capture and storage. Cambridge: Cambridge University Press, for the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005.
- [117] "IFS process engineering company 2022." May 27, 2022. <https://ifsolutions.com/pre-combustion-vs-post-combustion-carbon-capture/>
- [118] R. Pardemann and M. Bernd, "Pre-Combustion Carbon Capture," *Engineering, Environmental Science, Physics*, Jul. 2015, doi: <https://doi.org/10.1002/9781118991978.hceso61>.
- [119] C. Cong, D. Yimin, and D. Raf, "Post-combustion carbon capture," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 138, March 2021, 110490, Mar. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110490>.
- [120] R. P. Gupta, B. J. P. Buhre, L. K. Elliott, and C. D. Sheng, "Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation," *Progress in Energy and Combustion Science* Volume 31, Issue 4, pp. 283–307, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2005.07.001>.
- [121] "OXY-COMBUSTION." <https://www.netl.doe.gov/node/7477>
- [122] K. Jordal, M. Anheden, J. Yan, and L. Stromberg, "Oxyfuel combustion for coal-fired power generation with CO₂ capture—Opportunities and challenges," in *Greenhouse Gas Control Technologies* 7, vol. 1, Elsevier, 2005, pp. 201–209. doi: 10.1016/B978-008044704-9/50021-5.
- [123] T. Wall, "Fundamentals of oxyfuel combustion." <https://ieaghg.org/docs/oxyfuel/w1/04W1Wall.pdf>
- [124] I. Hadjipaschalis, G. Kourtis, and A. Poullikkas, "Assessment of oxyfuel power generation technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 9, pp. 2637–2644, Dec. 2009, doi: 10.1016/j.rser.2009.07.001.
- [125] T. A. Adams, "Challenges and Opportunities in the Design of New Energy Conversion Systems," in *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 34, Elsevier, 2014, pp. 5–14. doi: 10.1016/B978-0-444-63433-7.50002-X.
- [126] A. H. Ruhaimi, M. A. A. Aziz, and A. A. Jalil, "Magnesium oxide-based adsorbents for carbon dioxide capture: Current progress and future opportunities," *Journal of CO₂ Utilization*, vol. 43, p. 101357, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jcou.2020.101357.
- [127] M. Andrade, S. C. Rodrigues, and A. Mendes, "High performing CMS adsorbent for O₂ / N₂ separation," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 296, p. 109989, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.micromeso.2019.109989.
- [128] E. J. Granite and T. O'Brien, "Review of novel methods for carbon dioxide separation from flue and fuel gases," *Fuel Processing Technology*, vol. 86, no. 14–15, pp. 1423–1434, Oct. 2005, doi: 10.1016/j.fuproc.2005.01.001.
- [129] H. Yang et al., "Progress in carbon dioxide separation and capture: A review," *Journal of Environmental Sciences*, vol. 20, no. 1, pp. 14–27, Jan. 2008, doi: 10.1016/S1001-0742(08)60002-9.
- [130] A. A. Olajire, "CO₂ capture and separation technologies for end-of-pipe applications – A review," *Energy*, vol. 35, no. 6, pp. 2610–2628, Jun. 2010, doi: 10.1016/j.energy.2010.02.030.
- [131] European Commission. Joint Research Centre. Institute for Energy., J. Serpa, J. Morbee, and E. Tzimas, Technical and economic characteristics of a CO₂ transmission pipeline infrastructure. LU: Publications Office, 2011. <https://data.europa.eu/doi/10.2790/30861>
- [132] "CO₂ Tankanlage: Kohlendioxid für Industrie & Gewerbe." <https://www.gasido.de/co2-tank-kohlendioxid>
- [133] S. Höller and P. Viebahn, "Assessment of CO₂ storage capacity in geological formations of Germany and Northern Europe," *Energy Procedia*, vol. 4, pp. 4897–4904, 2011, doi: 10.1016/j.egypro.2011.02.458.
- [134] K. L. Anthonsen, T. Vangkilde-Pedersen, and L. H. Nielsen, "Estimates of CO₂ storage capacity in Europe".
- [135] A. Lokhorst and T. Wildenborg, "Introduction on CO₂ Geological Storage - Classification of Storage Options," *Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP*, vol. 60, no. 3, pp. 513–515, May 2005, doi: 10.2516/ogst:2005033.

Literatura

- [136] Ton Wildenborg et al., "BUILDING THE COST CURVES FOR CO₂ STORAGE: EUROPEAN SECTOR." Feb. 2004.
- [137] P. Noothout, F. Wiersma, O. Hurtado, D. Macdonald, J. Kemper, and K. Van Alphen, "CO₂ Pipeline Infrastructure – Lessons Learnt," *Energy Procedia*, vol. 63, pp. 2481–2492, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.11.271.
- [138] "North Sea pipeline to transport CO₂ from Germany to storage sites in Norway," Aug. 2022. <https://www.offshore-mag.com/pipelines/article/14281987/north-sea-pipeline-to-transport-co2-from-germany-to-storage-sites-in-norway>
- [139] E. Smith, J. Morris, H. Khesghi, G. Teletzke, H. Herzog, and S. Paltsev, "The cost of CO₂ transport and storage in global integrated assessment modeling," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 109, p. 103367, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.ijggc.2021.103367.
- [140] T. Rajabloo, J. Valee, Y. Marenne, L. Coppens, and W. De Ceuninck, "Carbon capture and utilization for industrial applications," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 111–116, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.egypr.2022.12.009.
- [141] D. Saygin und D. Gielen, „Zero-Emission Pathway for the Global Chemical and Petrochemical Sector“, *Energies*, Bd. 14, Nr. 13, S. 3772, Juni 2021, doi: 10.3390/en14133772.
- [142] Á. Galán-Martín, V. Tulus, I. Díaz, C. Pozo, J. Pérez-Ramírez, und G. Guillén-Gosálbez, „Sustainability footprints of a renewable carbon transition for the petrochemical sector within planetary boundaries“, *One Earth*, Bd. 4, Nr. 4, S. 565–583, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.oneear.2021.04.001.
- [143] IEA 2018 „The Future of Petrochemicals“. https://iea.blob.core.windows.net/assets/bee4ef3a-8876-4566-98cf-7a130c013805/The_Future_of_Petrochemicals.pdf
- [144] Global CCS Institute "State-of-the-Art-CCS-Technologies" 2023 https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2023/10/State-of-the-Art-CCS-Technologies-2023_09_Final.pdf