

Captura de Dióxido de Carbono

Dr. Norberto O. Lemcoff

Encuentro Red H2 CYTED 2023

Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, 22 de noviembre de 2023

Contenido

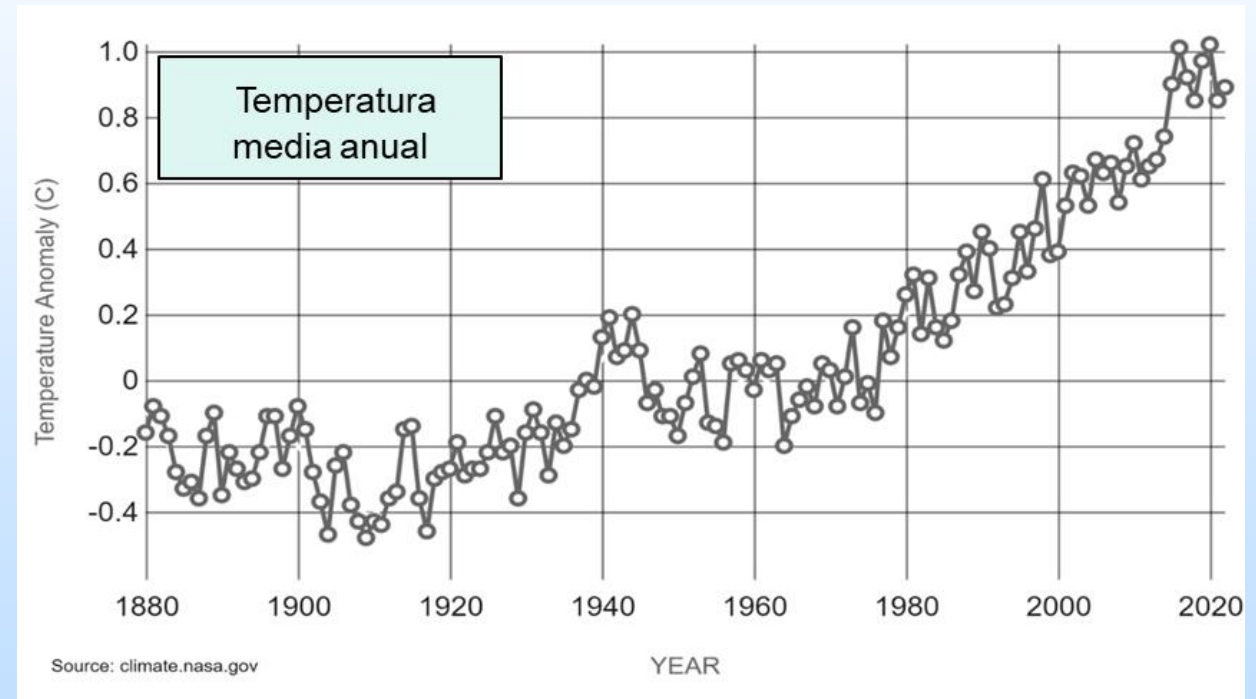
- Introducción
- Emisiones de dióxido de carbono
 - Fuentes puntuales
 - Fuentes distribuidas
- Configuraciones para la captura de dióxido de carbono
 - Post-combustión
 - Pre-combustión
 - Oxi-combustión
- Tecnologías de captura de dióxido de carbono
 - Captura de CO₂ de los gases de combustión
 - Captura de CO₂ en plantas de reformado con vapor
 - Captura directa de aire
- Resumen

Calentamiento Global

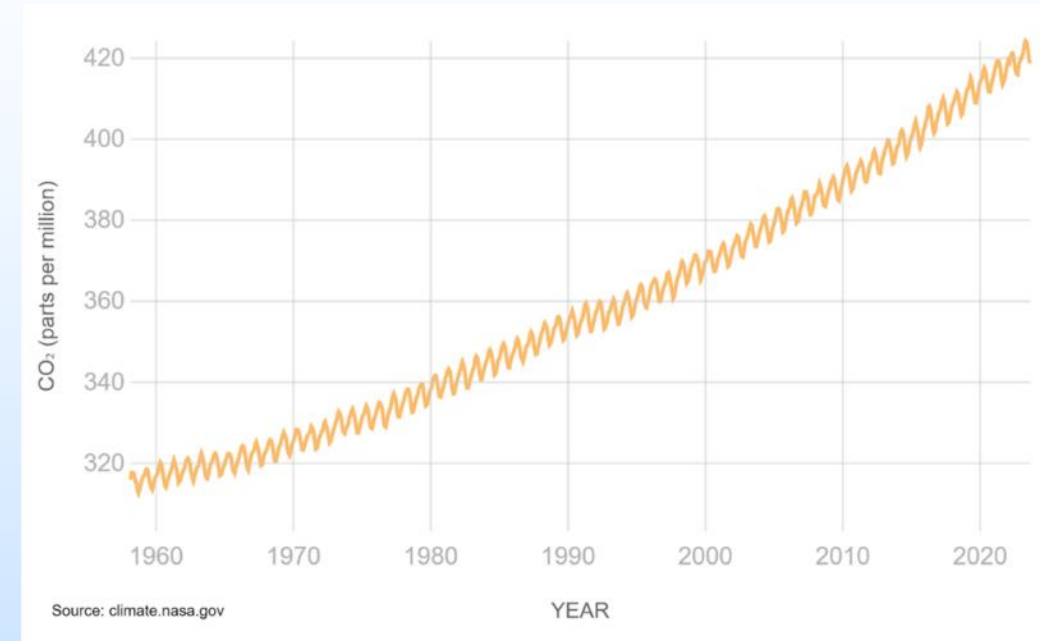
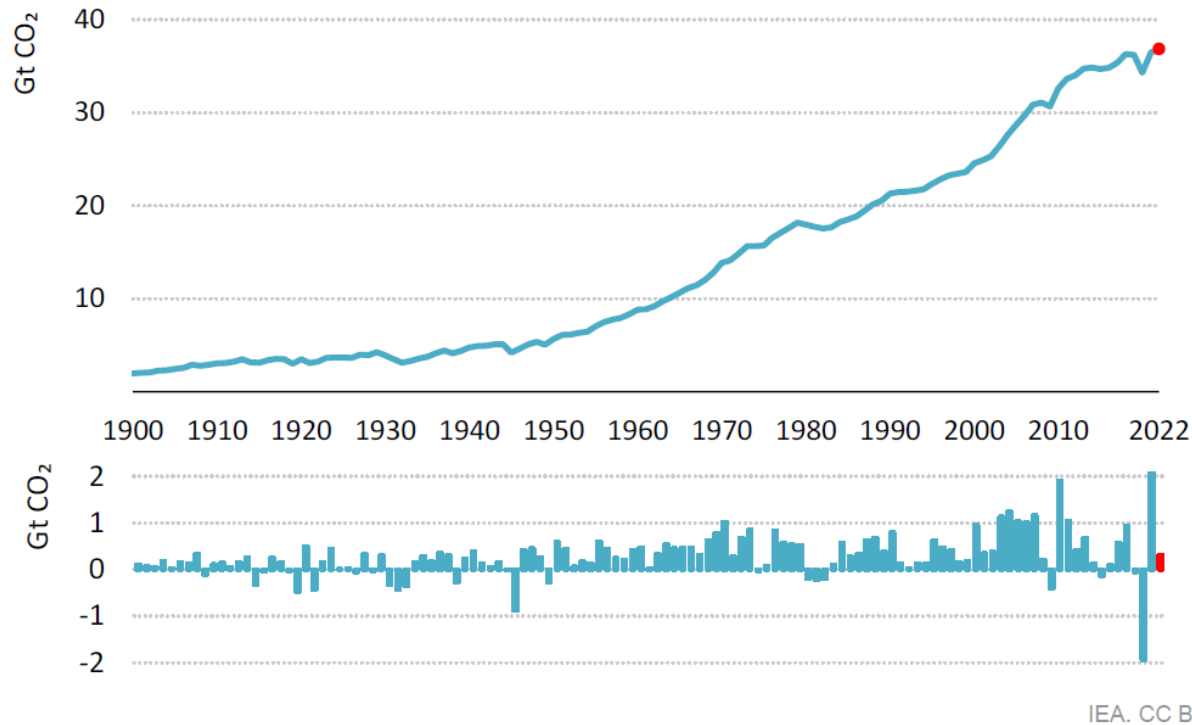
El calentamiento global es el aumento inusualmente rápido de la temperatura media de la superficie de la Tierra durante el siglo pasado, debido principalmente a los gases de efecto invernadero (agua, metano, dióxido de carbono, óxido nitroso).

La temperatura media mundial de la superficie aumentó más de 1°C en los últimos cien años.

Las causas naturales de este aumento siguen vigentes hoy en día, sin embargo, su influencia es demasiado pequeña para explicar la tendencia actual al calentamiento.

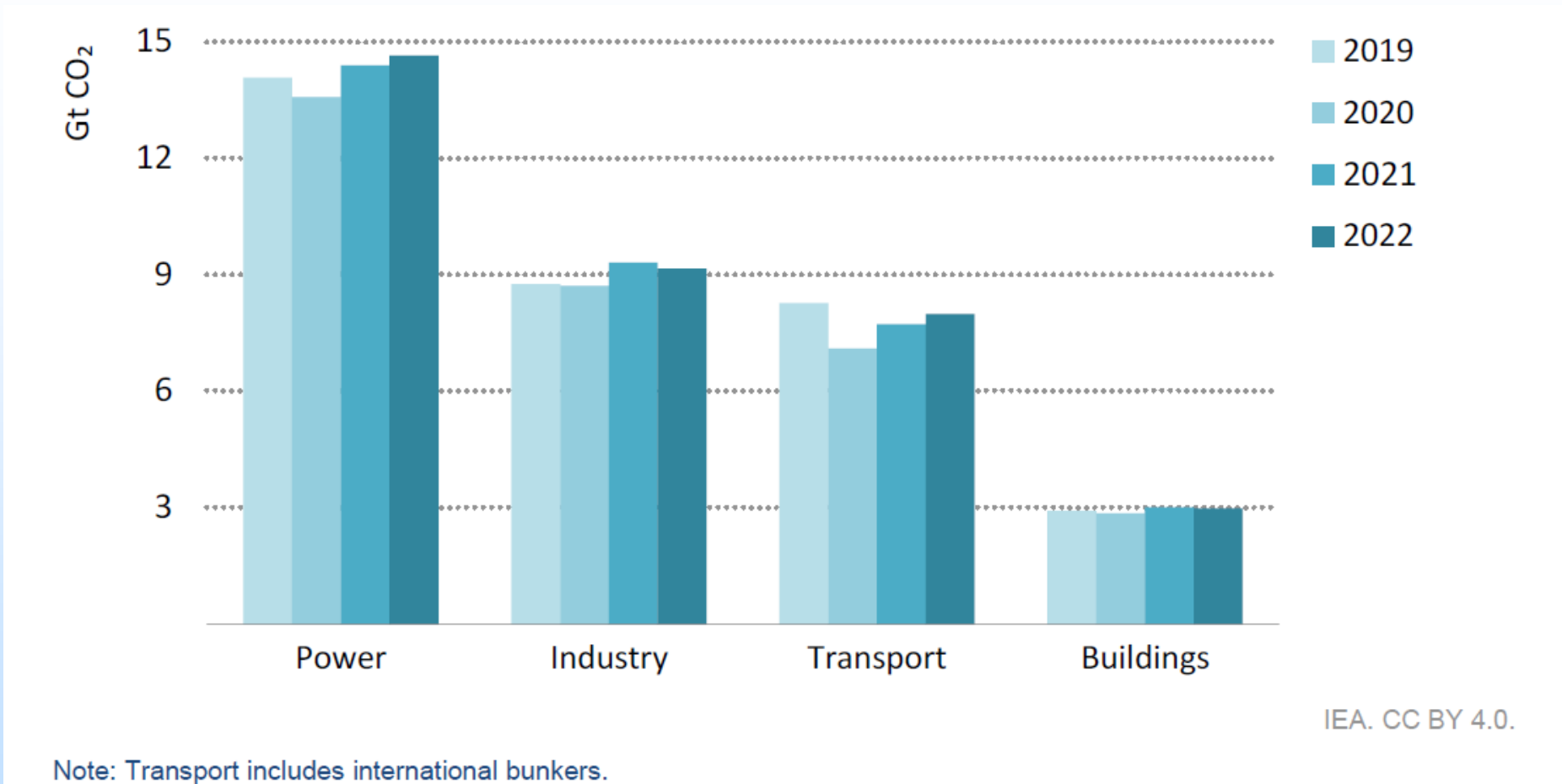


Emisiones globales de CO₂ procedentes de la combustión y los procesos industriales



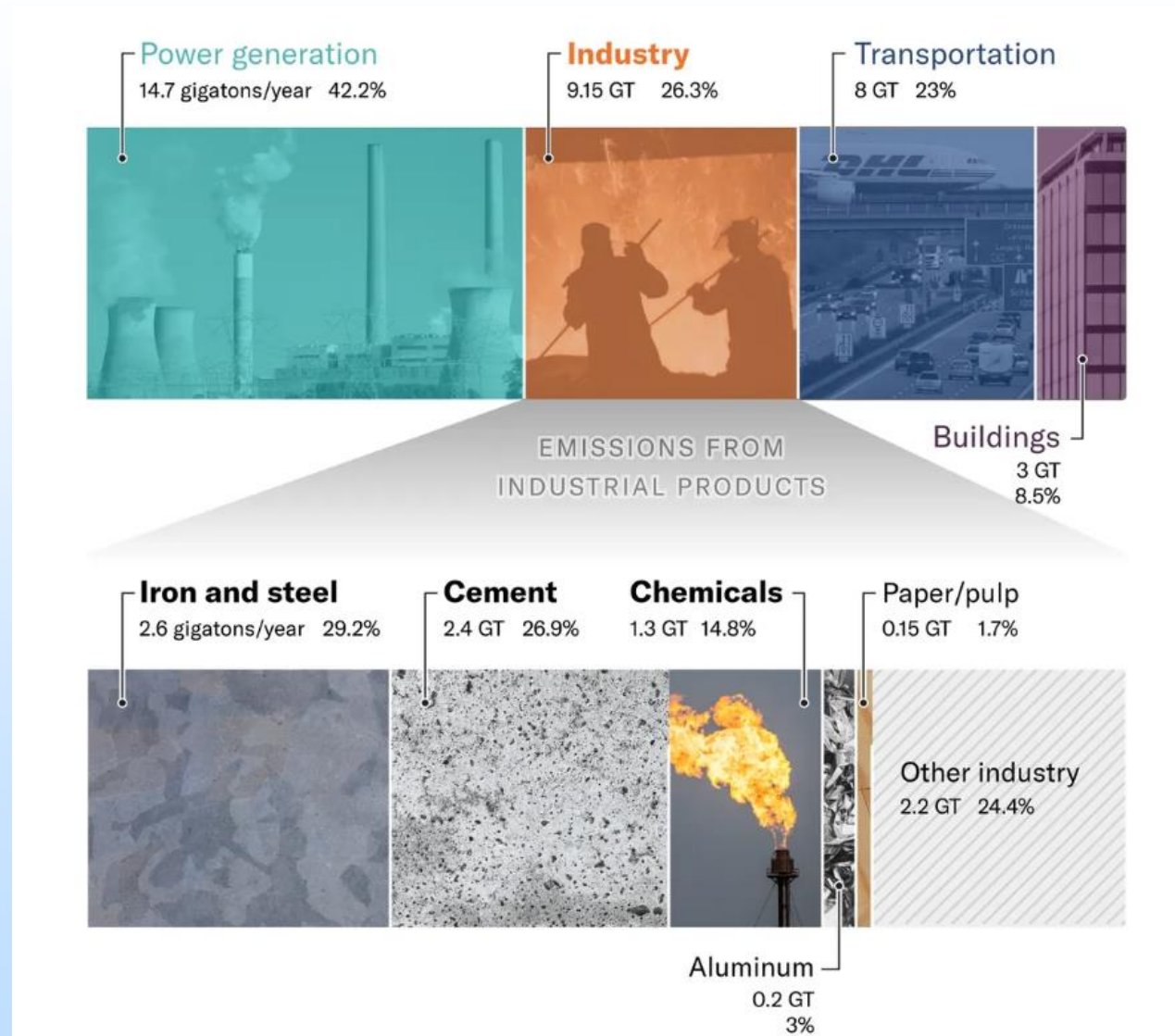
Desde el inicio de la época industrial en el siglo XVIII, las actividades humanas han acelerado las emisiones de CO₂ y aumentado su concentración en la atmósfera en un 50%. Este aumento inducido por el hombre es mayor que el aumento natural observado al final del ultimo periodo glacial, hace más de 10.000 años.

Emisiones globales de CO₂ por sector, 2019-2022



Las plantas térmicas son responsables de más del 40% de las emisiones totales de CO₂

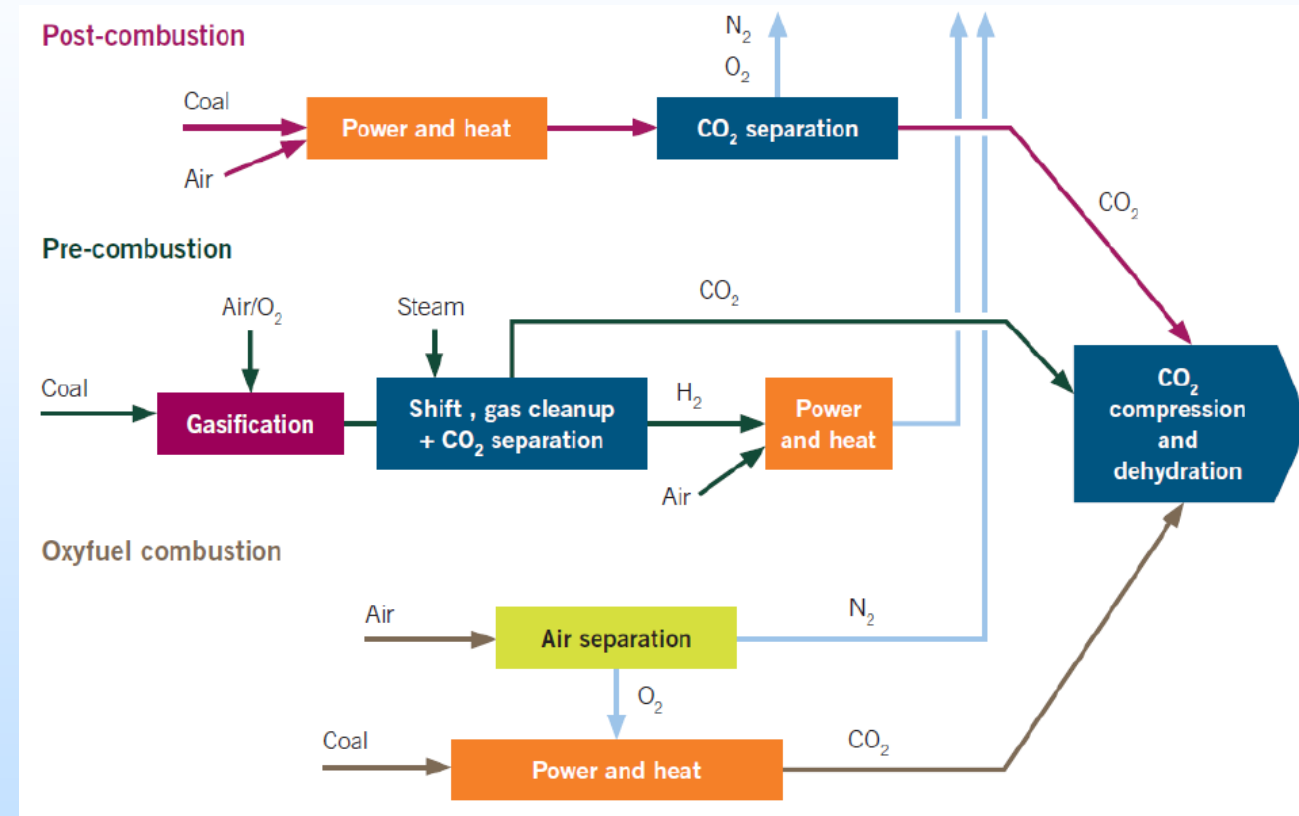
Emisiones globales anuales de carbón, 2022



Configuraciones para la captura de dióxido de carbono

Los sistemas de captura de dióxido de carbono se pueden clasificar en tres categorías:

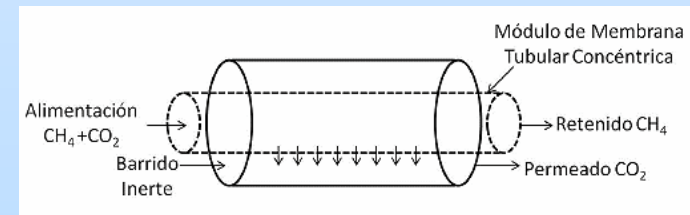
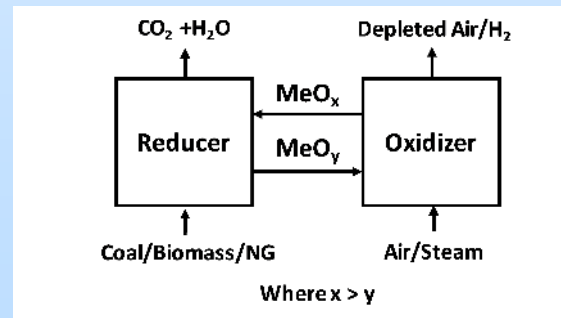
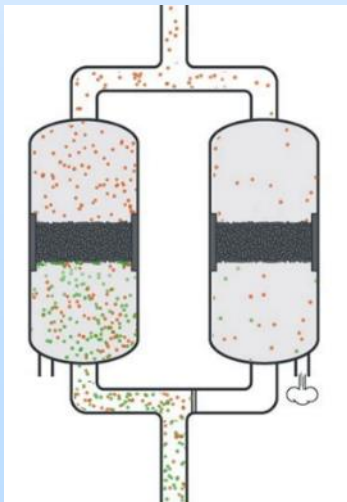
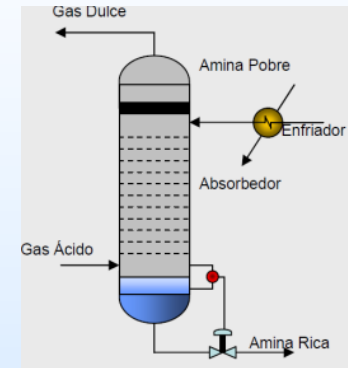
- **Post-combustión**
Utilizada sobre los gases de combustión. La concentración de CO_2 es reducida y deben eliminarse impurezas como SO_2 y NO_x .
- **Pre-combustión**
Utilizada después de procesos como reformado con vapor o gasificación de carbón, en los que se genera gas de síntesis. La concentración de CO_2 es alta.
- **Oxi-combustión**
Consiste en quemar carbón en un ambiente enriquecido en O_2 . Requiere una unidad de separación de aire y los niveles de NO_x son menores.



Fuente: IEAGHG – Technical Report 2017-TR3

Tecnologías de Captura de Dióxido de Carbono

Tecnología	
Absorción	Solución de aminas, amoniaco, alcalinas, líquidos iónicos
Membranas	Poliméricas, inorgánicas, transporte facilitado, matrices mixtas
Adsorción	Zeolitas, carbones, MOFs, óxidos metálicos, aminas soportadas
Chemical looping	Combustión, reformado



Captura de Dióxido de Carbono de los Gases de Combustión



Proyecto de Captura de Dióxido de Carbono de los Gases de Combustión

Objetivo:

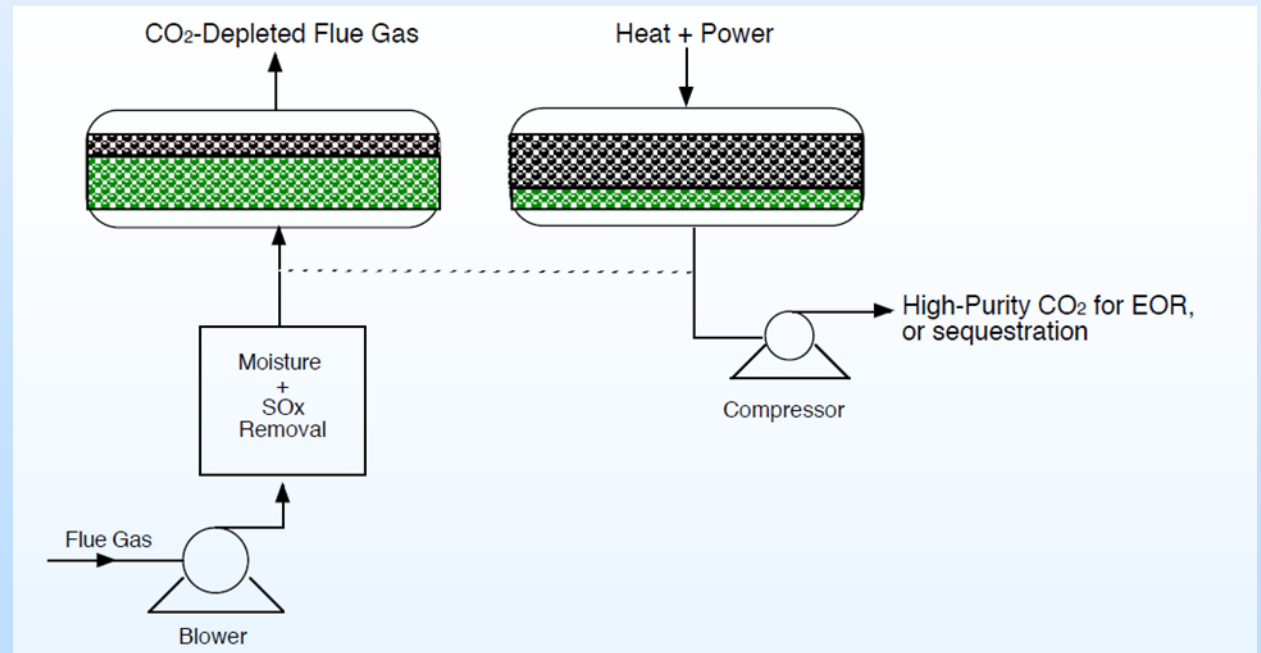
- Recuperación de más del 90% de CO_2 de los gases de combustión de una central térmica de carbón, con una pureza mayor del 95%, y con un costo estimado de captura de \$ 30/ton (límite establecido por el Departamento de Energía para el año 2035)

Actividades:

- Optimización del adsorbente y del proceso de regeneración a través de ensayos de laboratorio y simulaciones Monte Carlo
- Simulación de procesos, diseño detallado y estimación de costos
- Construcción de una unidad de ensayo de $500 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ (capacidad de captura de $140 \text{ kg/hr CO}_2 \sim 1200 \text{ ton/año CO}_2$)

Tecnología en Desarrollo

- Pretratamiento de los gases de combustión para la remoción de NO_2 y SO_x , captura de aerosoles y reducción del contenido de agua a niveles de ppb.
- Desarrollo de adsorbentes con alta área superficial ($> 800 \text{ m}^2/\text{g}$) y bajos calores de adsorción (0.8 GJ/ton CO_2).
- Mediante una combinación de procesos, materiales y regeneración del adsorbente es posible una reducción de la energía requerida de más del 45% con respecto a métodos tradicionales que usan soluciones líquidas de aminas.
- La energía total requerida es del orden de 1.6 a 1.8 GJ/ton CO_2 .
- La energía para la regeneración se necesita a una temperatura de 105°C comparada con más de 160°C para las aminas.

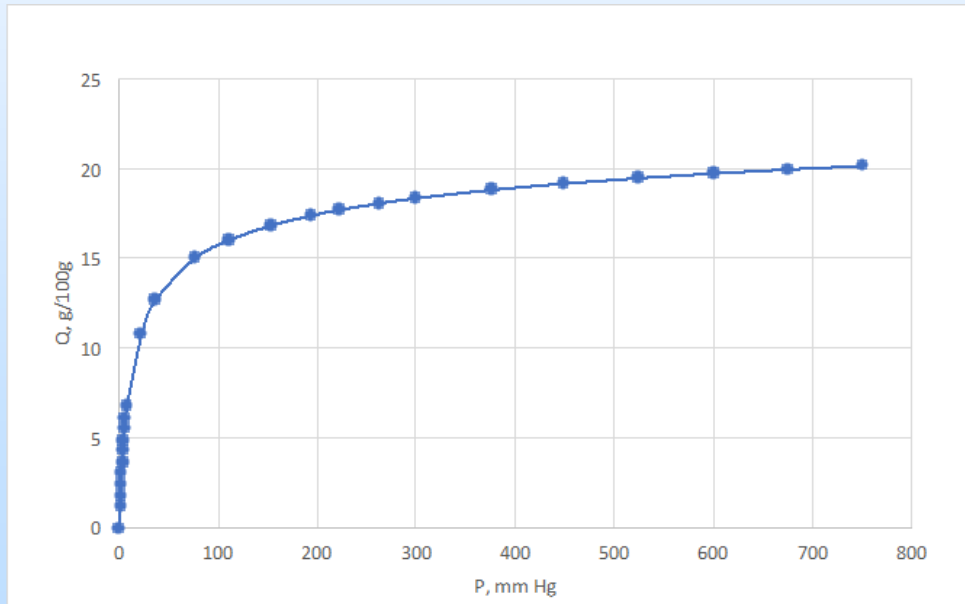


Identificación de Materiales

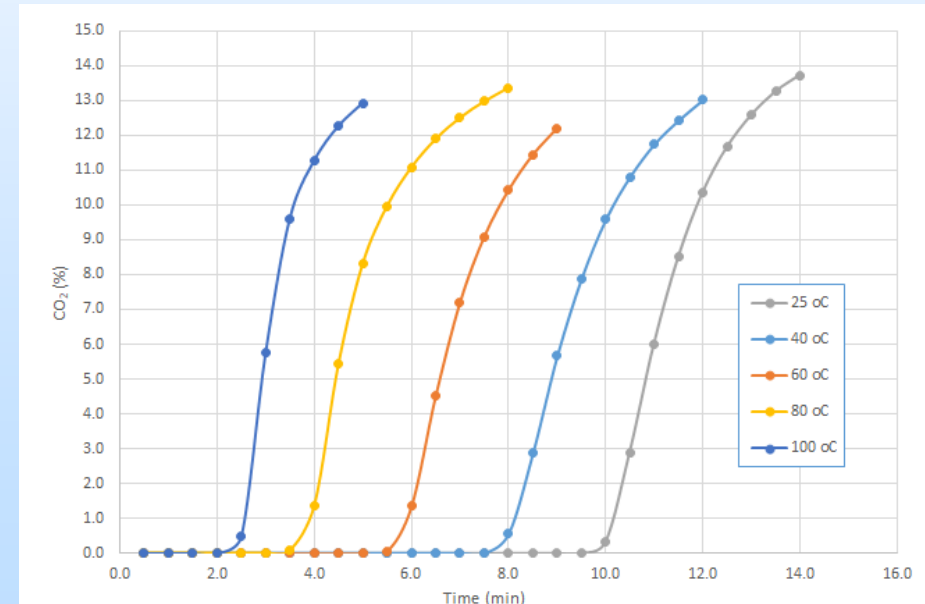
A partir de las simulaciones de Monte Carlo se identificaron varios materiales.

Se midieron las propiedades de adsorción en un aparato volumétrico Micromeritics ASAP 2020 Plus, y se determinaron las capacidades de CO_2 y N_2 , y la separación de mezclas de CO_2 y N_2

Se llevaron a cabo estudios de ruptura para determinar el efecto de N_2 sobre la adsorción de CO_2 .



Isoterma típica de CO_2 a 30°C



Curvas de ruptura de CO_2 (15%)

Diseño de la Planta Piloto

La planta piloto fue diseñada en tres unidades separadas

La unidad 1 consta de lo siguiente:

- Purificación de la alimentación - Eliminación del condensado, así como de NO_2 , SO_x y aerosoles
- Compresión y enfriamiento de la alimentación
- Secado de la alimentación

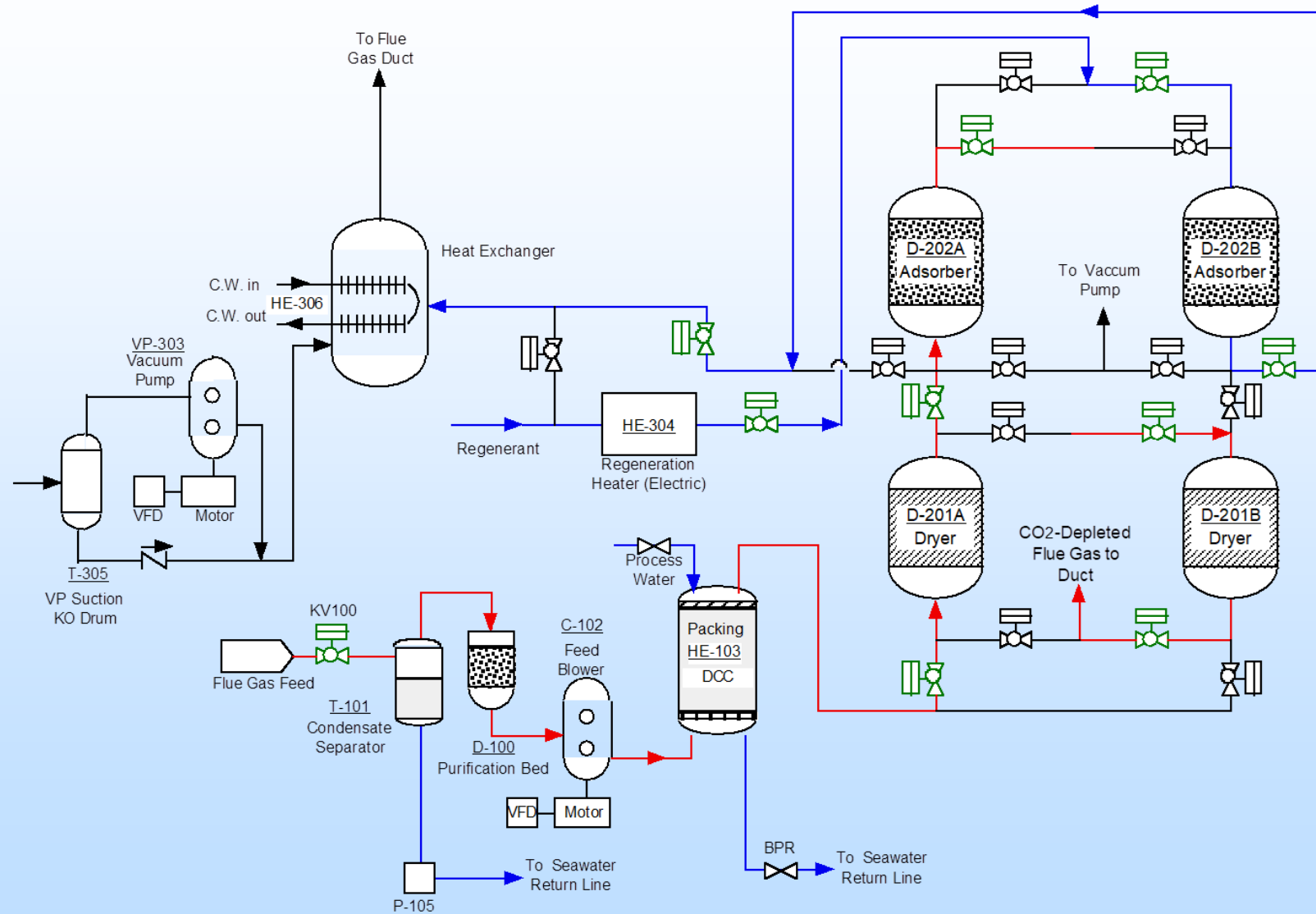
La unidad 2 consta de lo siguiente:

- Cuatro lechos de adsorción para la separación de CO_2 de los gases de combustión
- El ciclo del proceso consta de: adsorción, regeneración, enfriamiento y represurización
- El ciclo de cuatro lechos permite un funcionamiento continuo

La unidad 3 consta de lo siguiente:

- Bomba de vacío para evacuación
- Calentamiento del medio de regeneración
- Enfriamiento del CO_2 producido

Diagrama de Flujo de la Planta Piloto



Planta Piloto Instalada en TCM, Noruega



Plan de Ensayos

Se están realizando una serie de pruebas paramétricas, y se prevé una prueba continua de 200 horas.

Las condiciones de ensayo son:

Flujo de alimentación: 300-500 Nm³/hr

Concentración de CO₂ en la alimentación: 4 a 12%

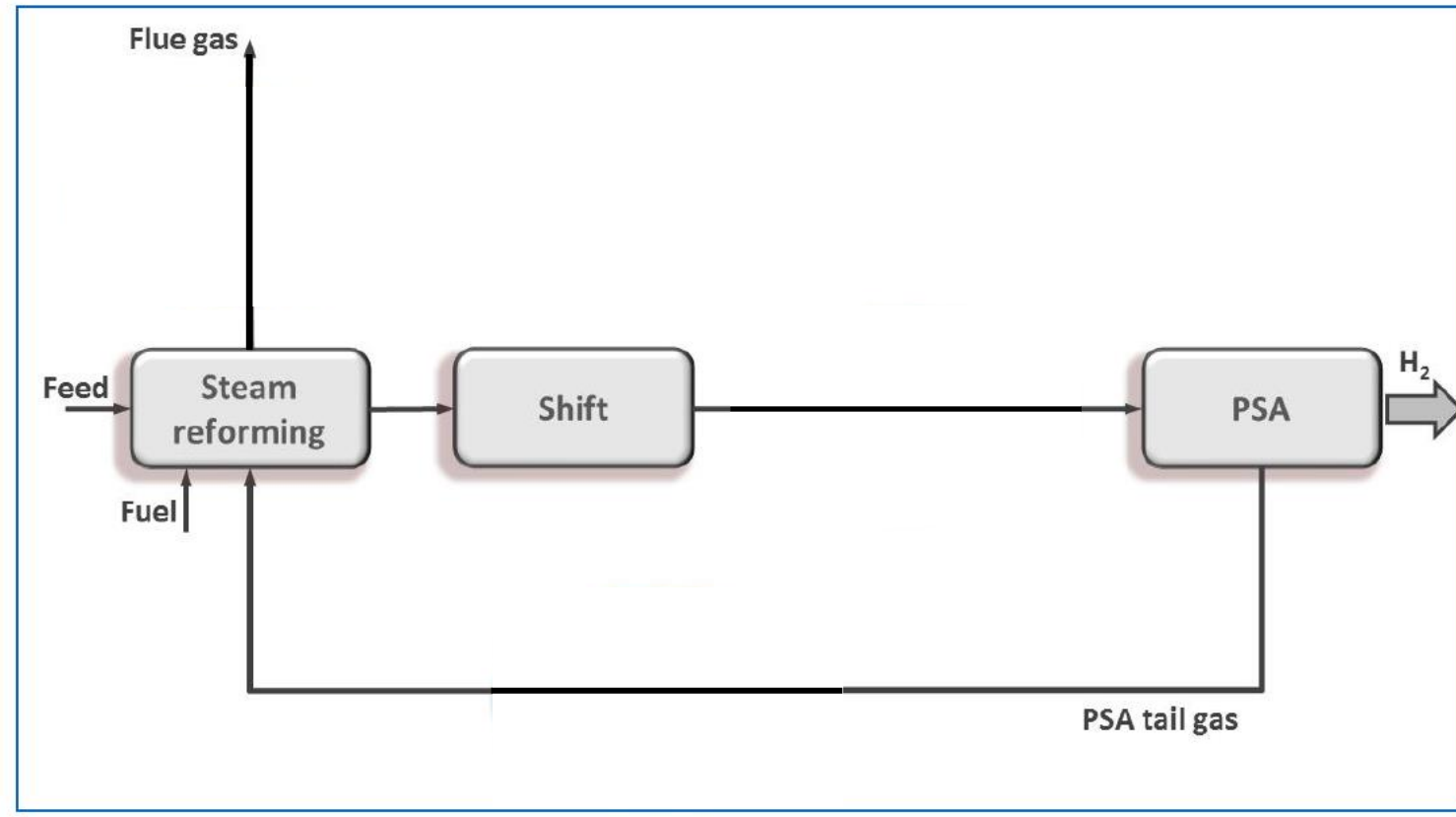
Tiempo de ciclo: 12 a 20 minutos

Temperatura de regeneración: 90 a 110°C

Captura de CO₂ en Plantas de Reformado con Vapor

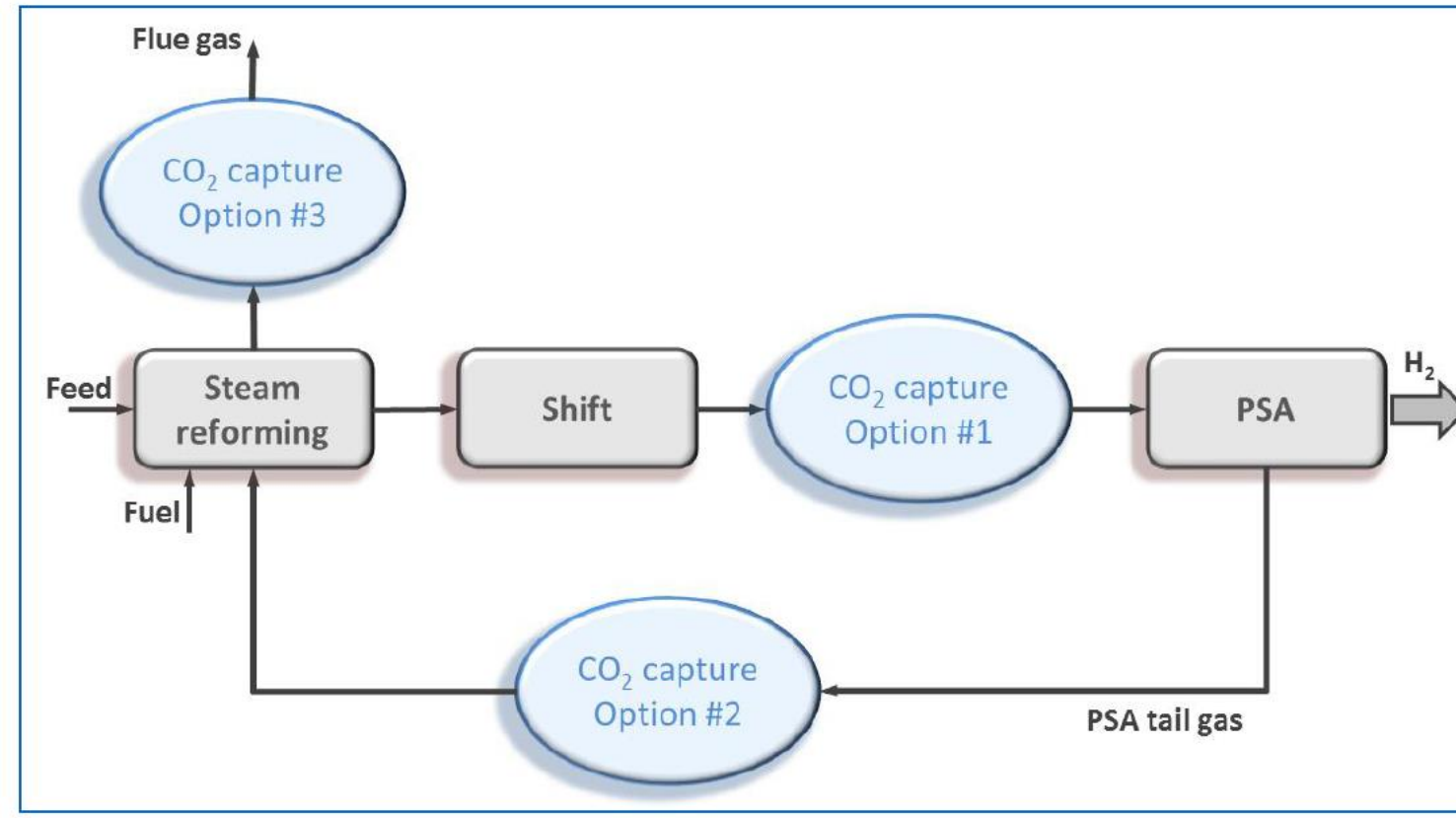


Planta de Reformado con Vapor



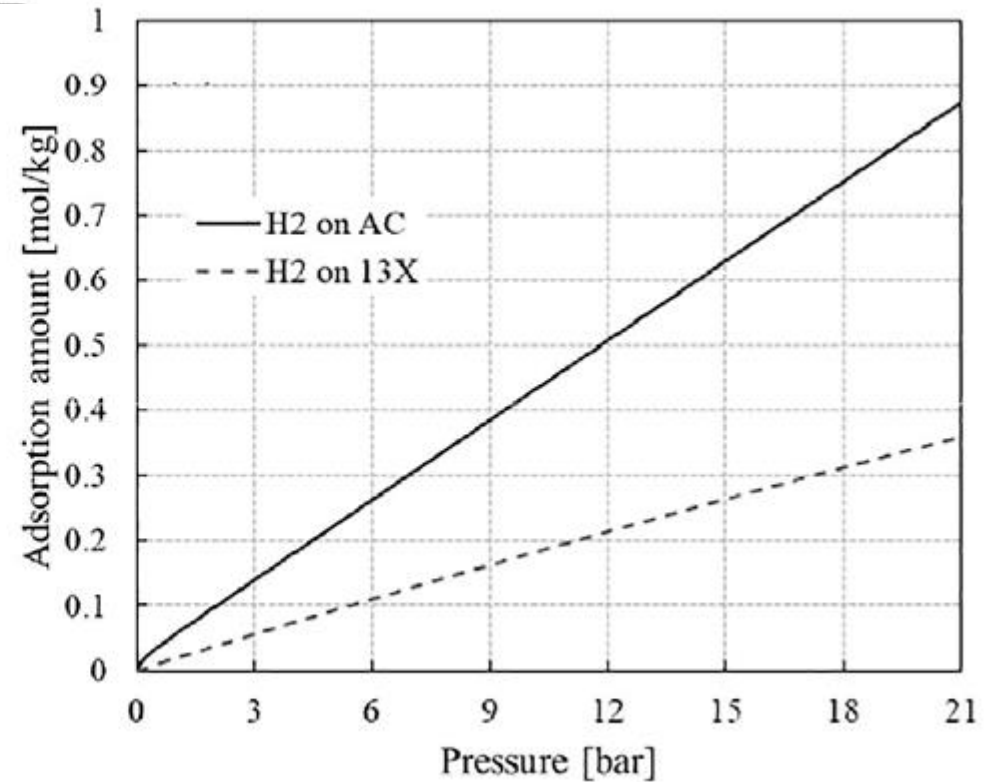
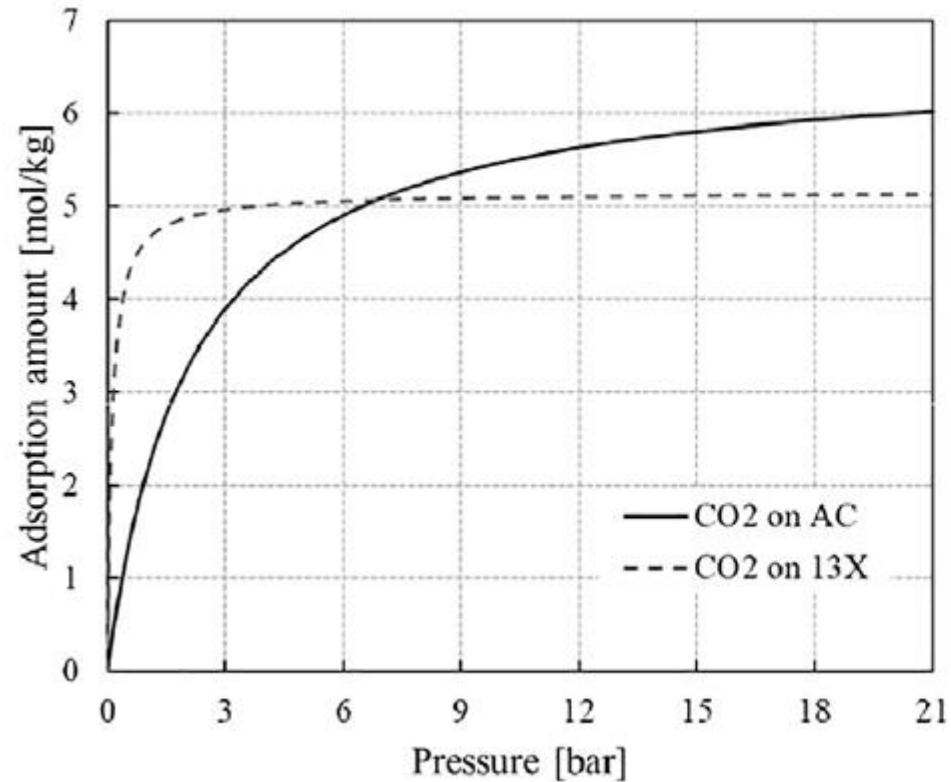
Esquema simplificado del proceso de reformado con vapor

Planta de Reformado con Vapor



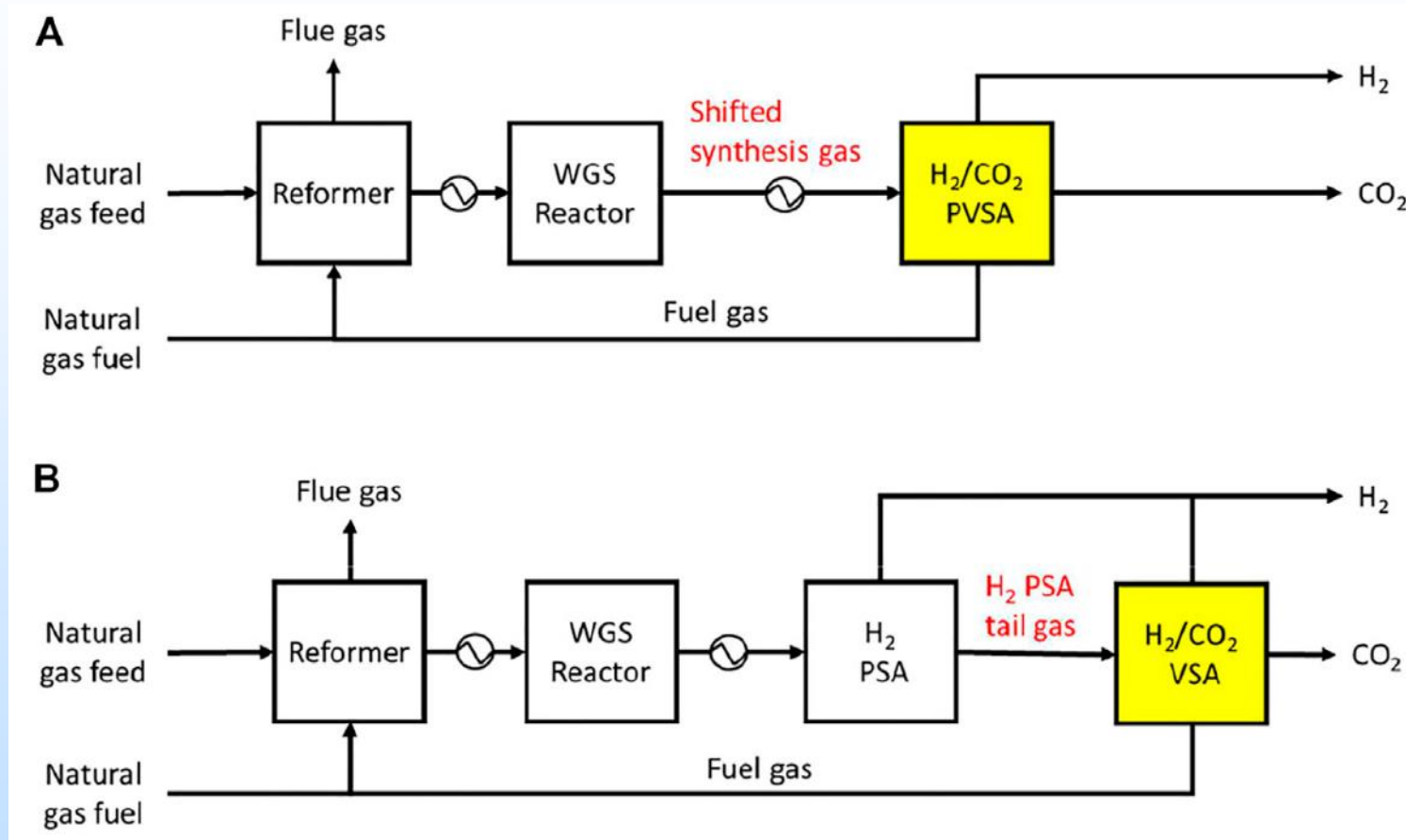
	P (bar)	CO ₂ (%)	
Gas de combustión	1.0	12-20	baja P, baja C
CO Shift	15-35	15-22	alta P, baja C
H ₂ gas de cola	1.3	45-60	baja P, alta C

Isotermas de adsorción de CO₂ e H₂ en carbón activado y zeolita 13X



El CO₂ se adsorbe más fuertemente en la zeolita 13X que en el carbón activado.
El H₂ muestra el efecto contrario.

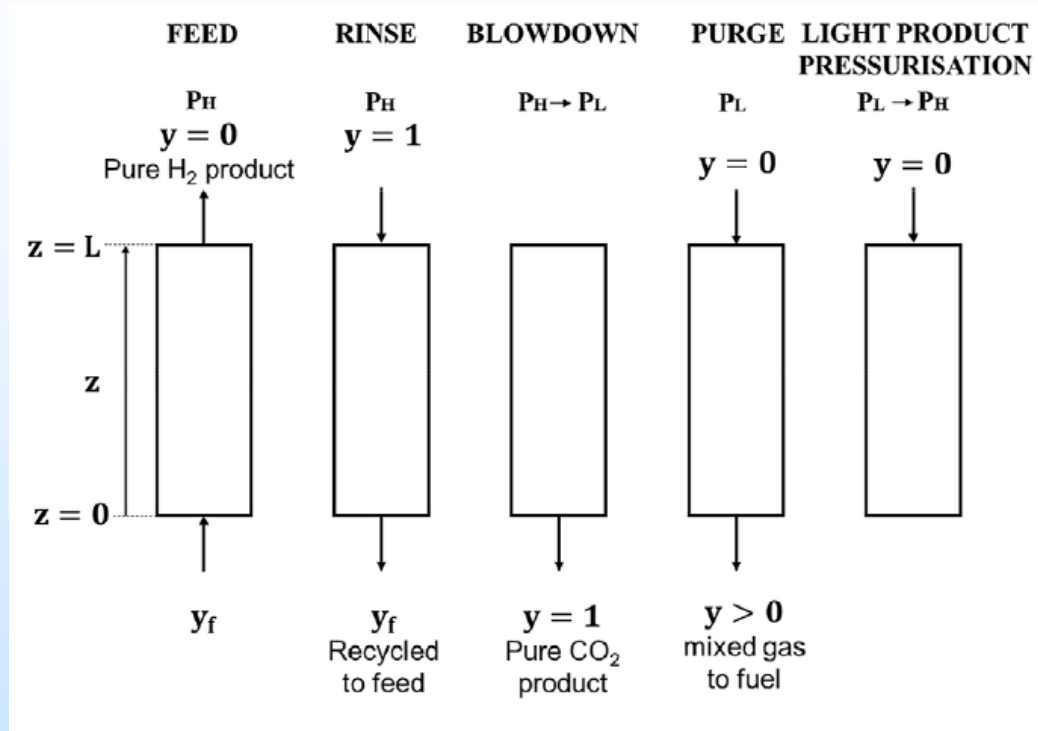
Diagrama de flujo de una planta SMR de hidrogeno integrada con un proceso PVSA para la captura de CO₂



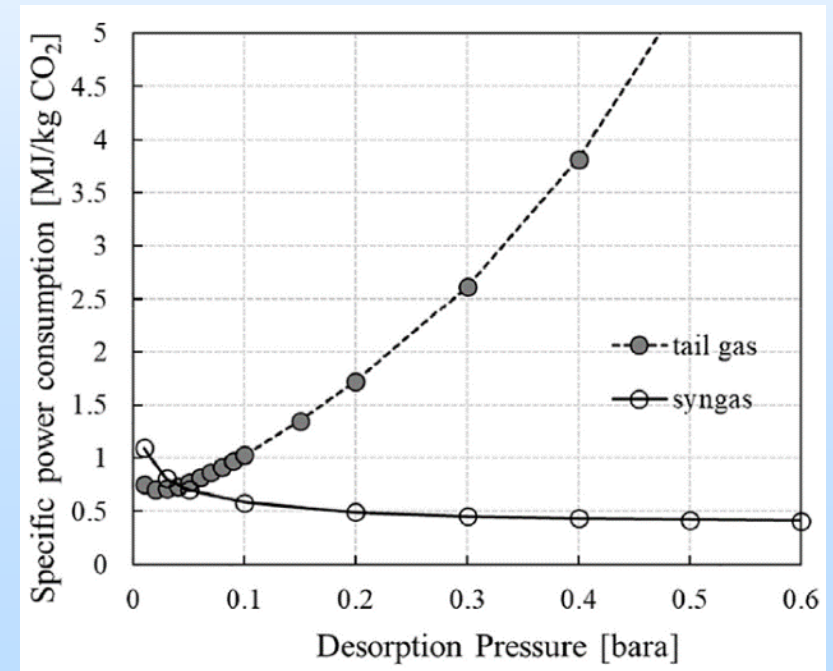
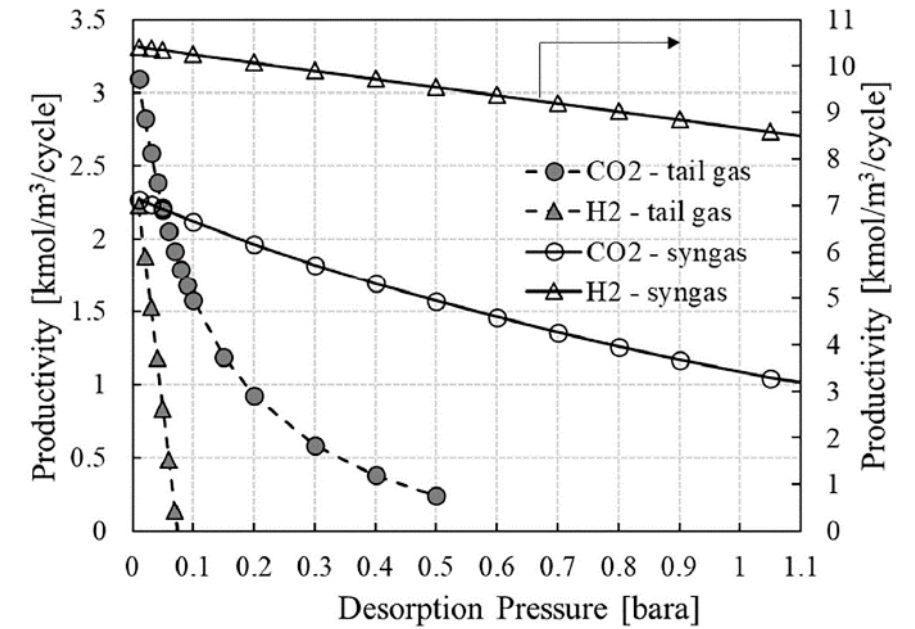
(A) captura de syngas con carbon activado

(B) captura de tail gas con zeolite 13X

Ciclo de PVSA para la captura de CO₂



Solo a bajas presiones (alto vacío) la captura de CO₂ del gas de cola resulta económicamente ventajoso.



Captura Directa de Aire – Direct Air Capture (DAC)



Captura Directa de Aire

La captura de CO₂ se hace directamente del aire

La concentración de CO₂ es aproximadamente 400 ppm

Los volúmenes de aire a tratar son muy grandes

El agua (humedad ambiente) es una impureza crítica

Hay más de 20 plantas de Captura Directa de Aire operando y en desarrollo en Europa, Estados Unidos y Canadá

Las plantas son de capacidad relativamente pequeña

Las compañías más grandes operando son:

- Global Thermostat – Estados Unidos
- Climeworks – Suiza
- Carbon Engineering – Canadá



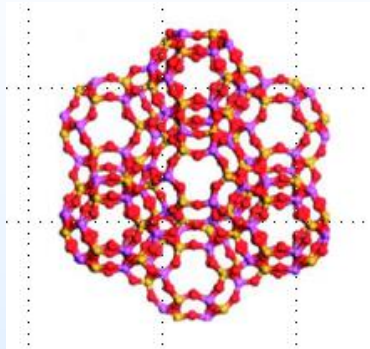
Plantas DAC en operación en el mundo

Company	Country	Sector	CO ₂ storage or use	Start-up year	CO ₂ capture capacity (tCO ₂ /year)
Global Thermostat	United States	R&D	Not known	2010	500
Global Thermostat	United States	R&D	Not known	2013	1 000
Climeworks	Germany	Customer R&D	Use	2015	1
Carbon Engineering	Canada	Power-to-X	Use	2015	Up to 365
Climeworks	Switzerland	Power-to-X	Use	2016	50
Climeworks	Switzerland	Greenhouse fertilisation	Use	2017	900
Climeworks	Iceland	CO ₂ removal	Storage	2017	50
Climeworks	Switzerland	Beverage carbonation	Use	2018	600
Climeworks	Switzerland	Power-to-X	Use	2018	3
Climeworks	Italy	Power-to-X	Use	2018	150
Climeworks	Germany	Power-to-X	Use	2019	3
Climeworks	Netherlands	Power-to-X	Use	2019	3
Climeworks	Germany	Power-to-X	Use	2019	3
Climeworks	Germany	Power-to-X	Use	2019	50
Climeworks	Germany	Power-to-X	Use	2020	50
Climeworks	Germany	Power-to-X	Use	2020	3
Climeworks	Germany	Power-to-X	Use	2020	3
Climeworks	Iceland	CO ₂ removal	Storage	2021	4 000

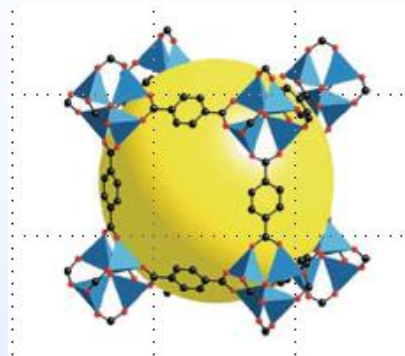
Enfoques tecnológicos

Actualmente se están utilizando dos enfoques tecnológicos para capturar CO₂ del aire:

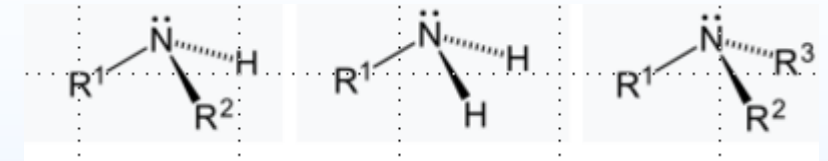
Vía sólidos



zeolitas

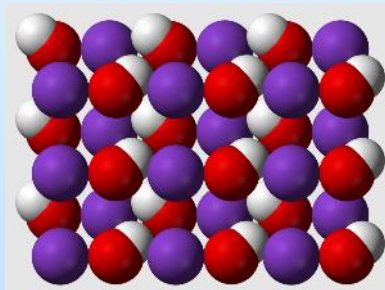


MOFs

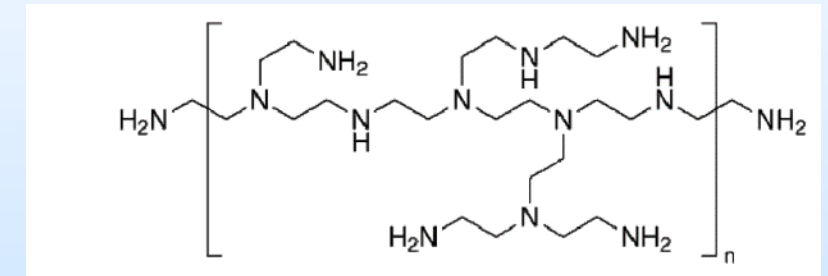


aminas soportadas

Vía líquidos



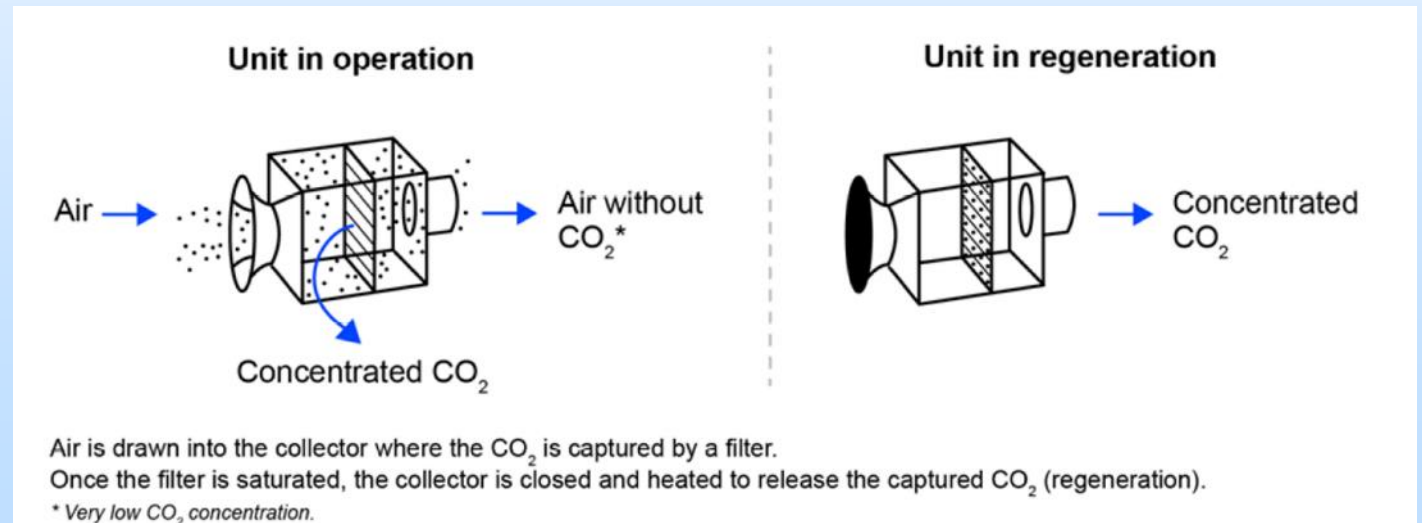
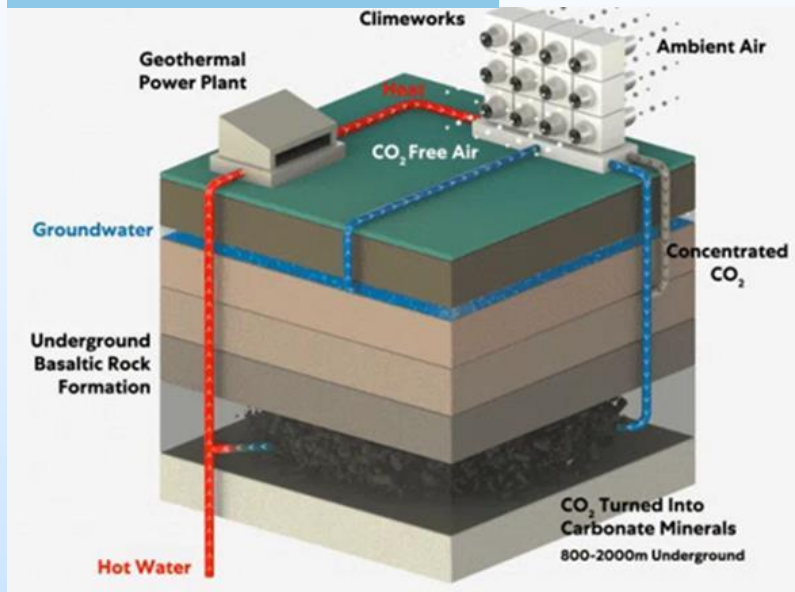
solución de
hidróxido
de potasio



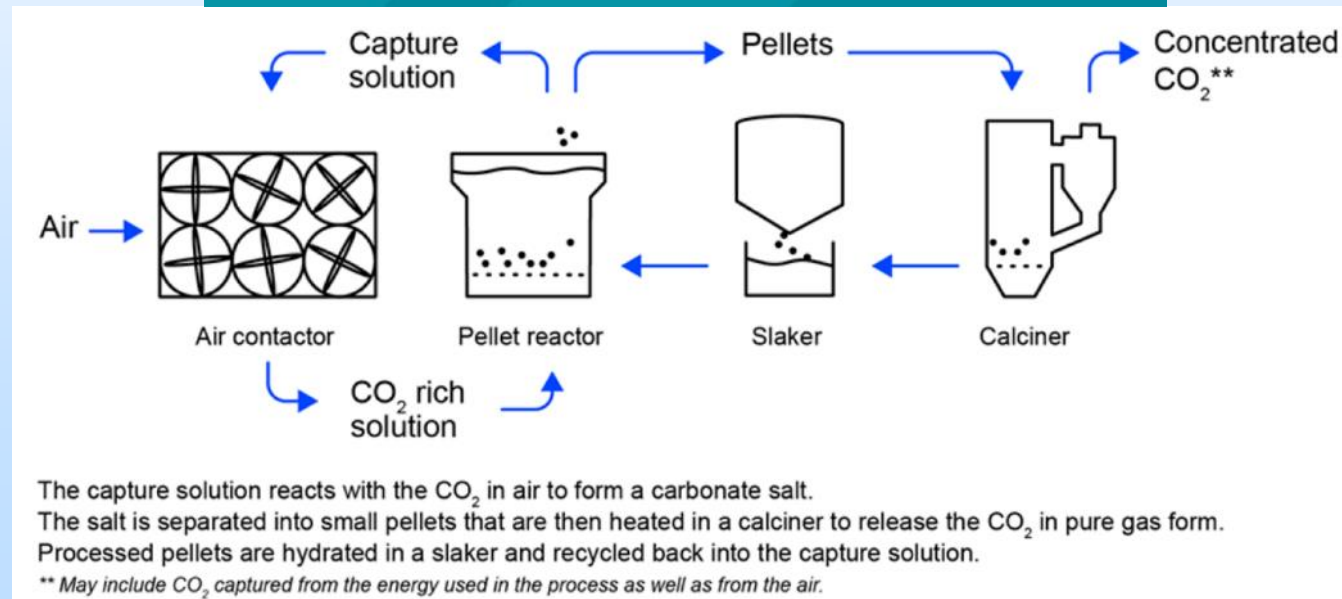
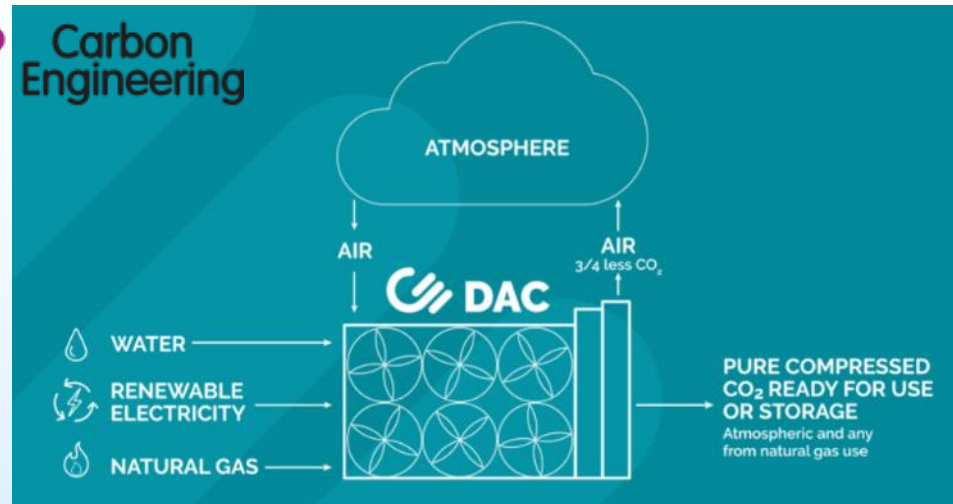
Hay enfoques emergentes a nivel de prototipo que incluyen

- adsorción por oscilación electroquímica
- separación mediante membranas.

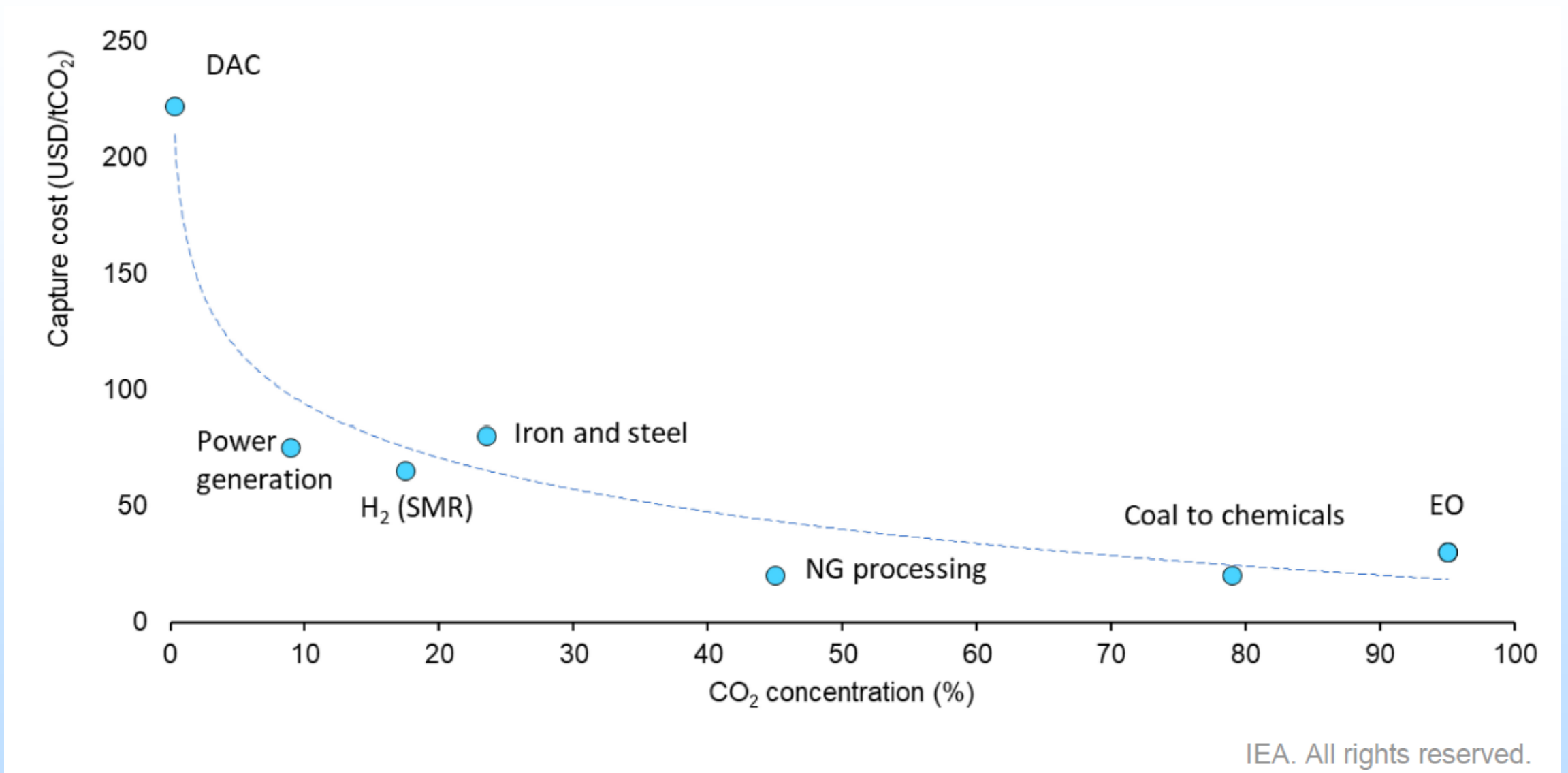
Captura Directa de Aire – Vía sólidos



Captura Directa de Aire – Vía líquidos



Costo de captura de CO₂ a diferentes concentraciones, 2020



Proyecto de Captura de Dióxido de Carbono del Aire

Objetivo:

Demostrar la eficacia de la tecnología DAC para producir CO₂ de alta pureza (más de 95%) con un consumo potencial de energía de <4 GJ/ton y un costo de captura de <\$200/ton para el año 2028

Actividades:

Preparación y caracterización de materiales adsorbentes para la captura de dióxido de carbono usando adsorbentes físicos en forma estructurada

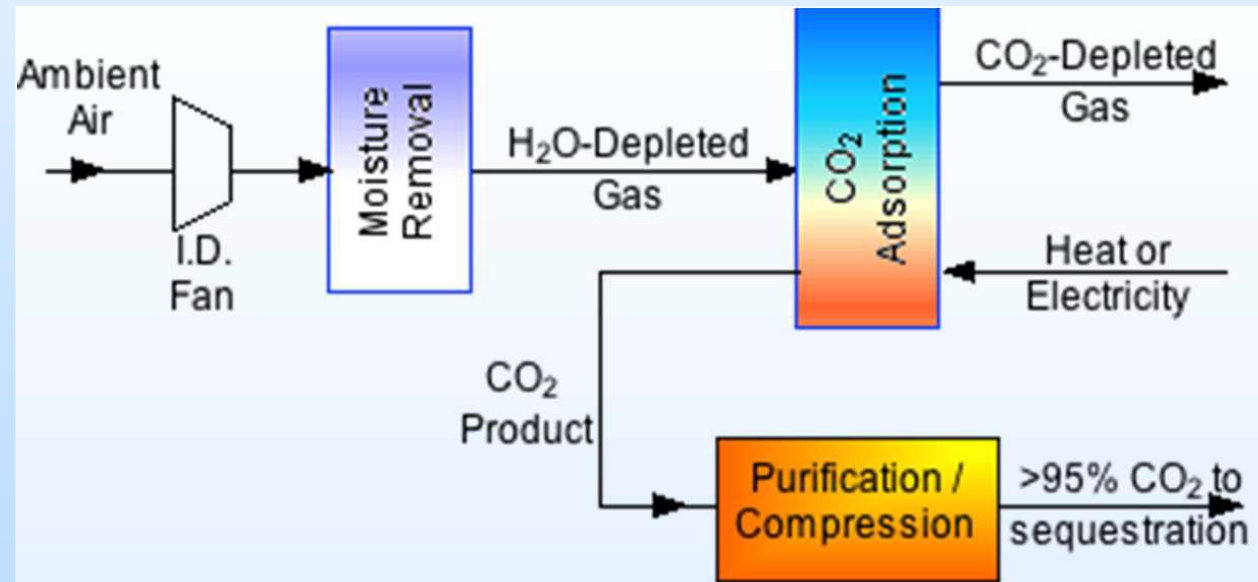
Desarrollo de un deshumidificador rotatorio basado en estructuras monolíticas

Desarrollo de unidad rotatoria para la captura de dióxido de carbono

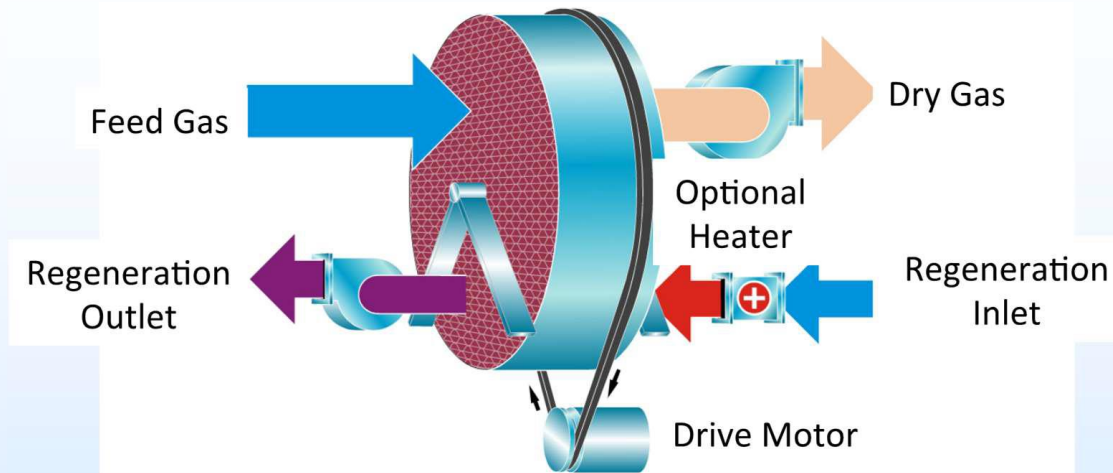
Construcción de una unidad de ensayo con una capacidad de captura de 3,5 kg/año CO₂

Tecnología en Desarrollo

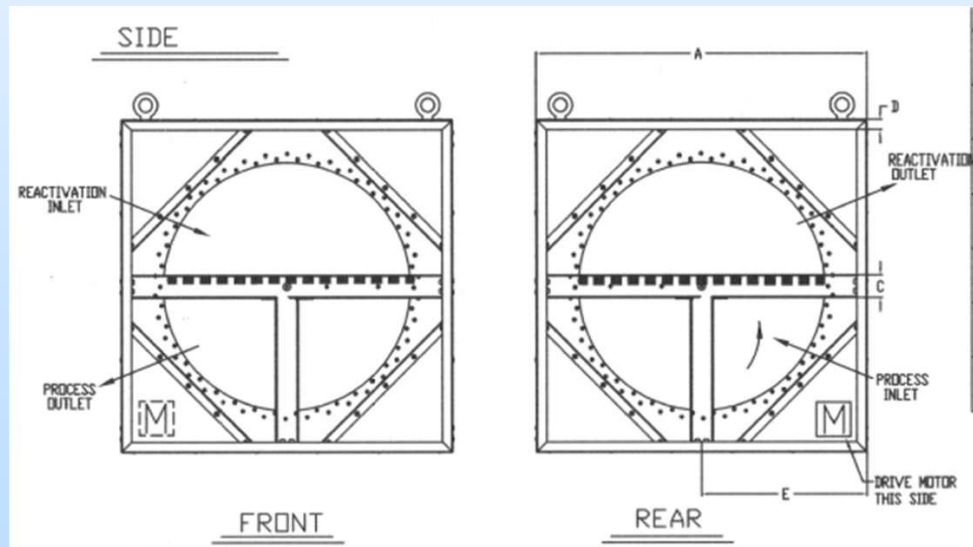
- Materiales base con alta capacidad de CO_2 ($>4\text{-wt\%}$ a $p\text{CO}_2 = 0,04 \text{ kPa}$), bajos calores de adsorción ($40\text{-}44 \text{ kJ/mol de CO}_2$)
- Modificación química de los materiales base para mejorar la capacidad y la selectividad
- Materiales de bajo costo, fácilmente escalables a las cantidades necesarias para uso comercial (miles de toneladas) y muy estables (>5 años de vida)



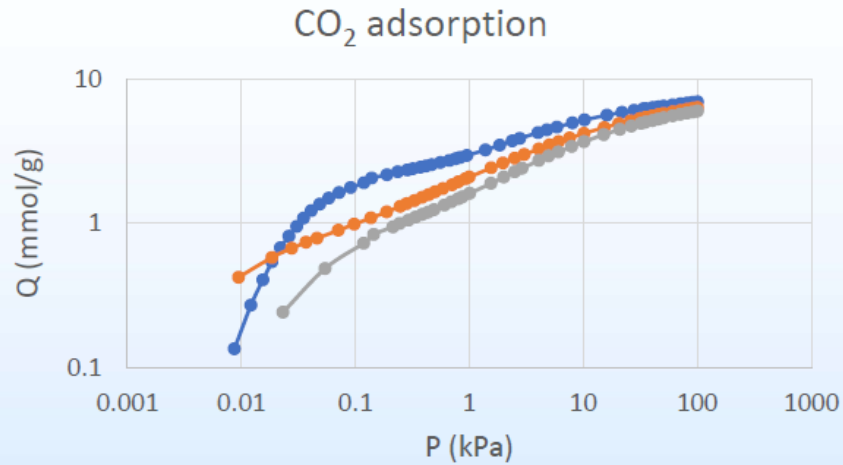
Rueda giratoria



Diámetro de la rueda: 25 cm
Longitud de la rueda: 40 cm

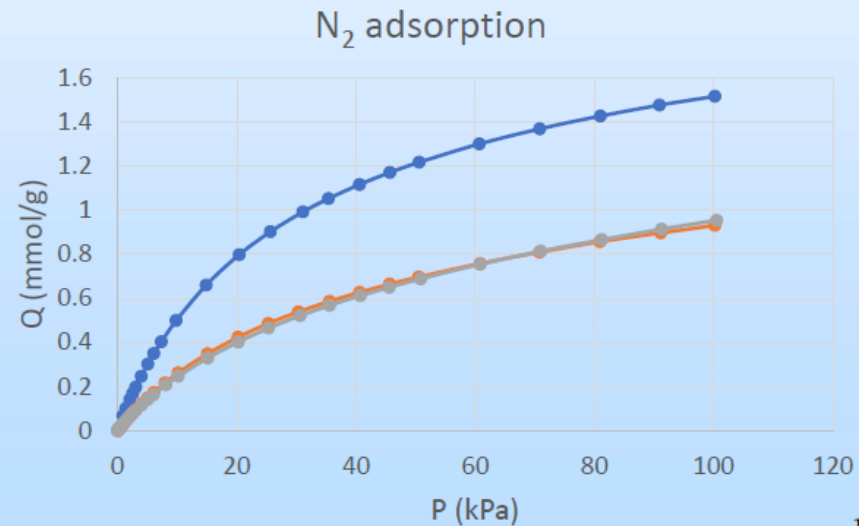


Selección de Materiales para la Adsorción Selectiva de CO₂



Isotermas de adsorción de
CO₂ y N₂ en el material B a
25°C

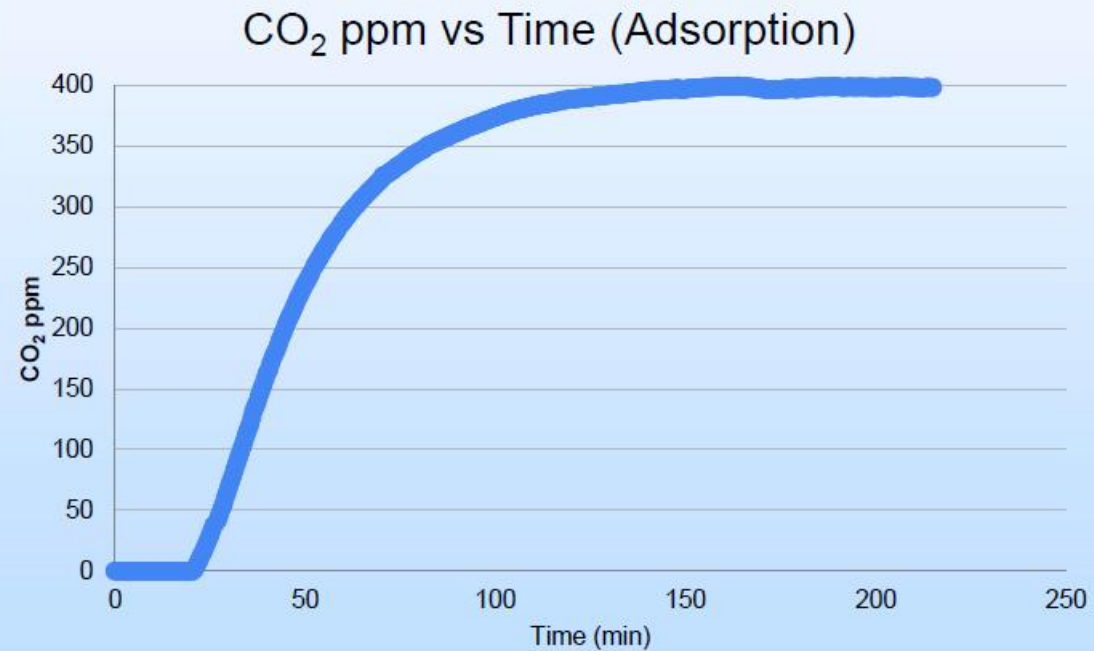
- Powder
- Lab laminate
- Commercial laminate



Curva de Ruptura de Dióxido de Carbono



Diámetro = 12.7 cm
Altura = 20.3 cm
Flujo = 21 litros/min
Temperatura = 23 °C



Planes de investigación y desarrollo

Mejora de las propiedades cinéticas y de equilibrio de las estructuras fabricadas comercialmente

Construcción de un módulo de captura de CO₂ del aire a escala banco / planta piloto

Actualización del modelo del proceso en función del material adsorbente a ser usado

Evaluación del requerimiento energético para la captura directa de aire

Actualización del análisis tecno-económico

Resumen

El calentamiento global está correlacionado con el aumento de la concentración de CO₂

Las plantas térmicas son responsables de más del 40% de las emisiones totales de CO₂

Es necesario descarbonizar y capturar las emisiones de CO₂

Se han y están siendo desarrolladas nuevas tecnologías para la remoción de CO₂ de diferentes fuentes y la adsorción puede jugar un papel importante

El diseño de materiales y procesos juegan un papel clave en la eficiencia de captura

El tratamiento de grandes volúmenes de gas (captura directa de aire) requiere diseños especiales

Muchas gracias por la atención!