

Asociación de la  
**Plataforma Tecnológica Española  
del CO<sub>2</sub>**

**Curso: Tecnologías de captura, almacenamiento y usos  
del CO<sub>2</sub>: Soluciones para afrontar el cambio climático**



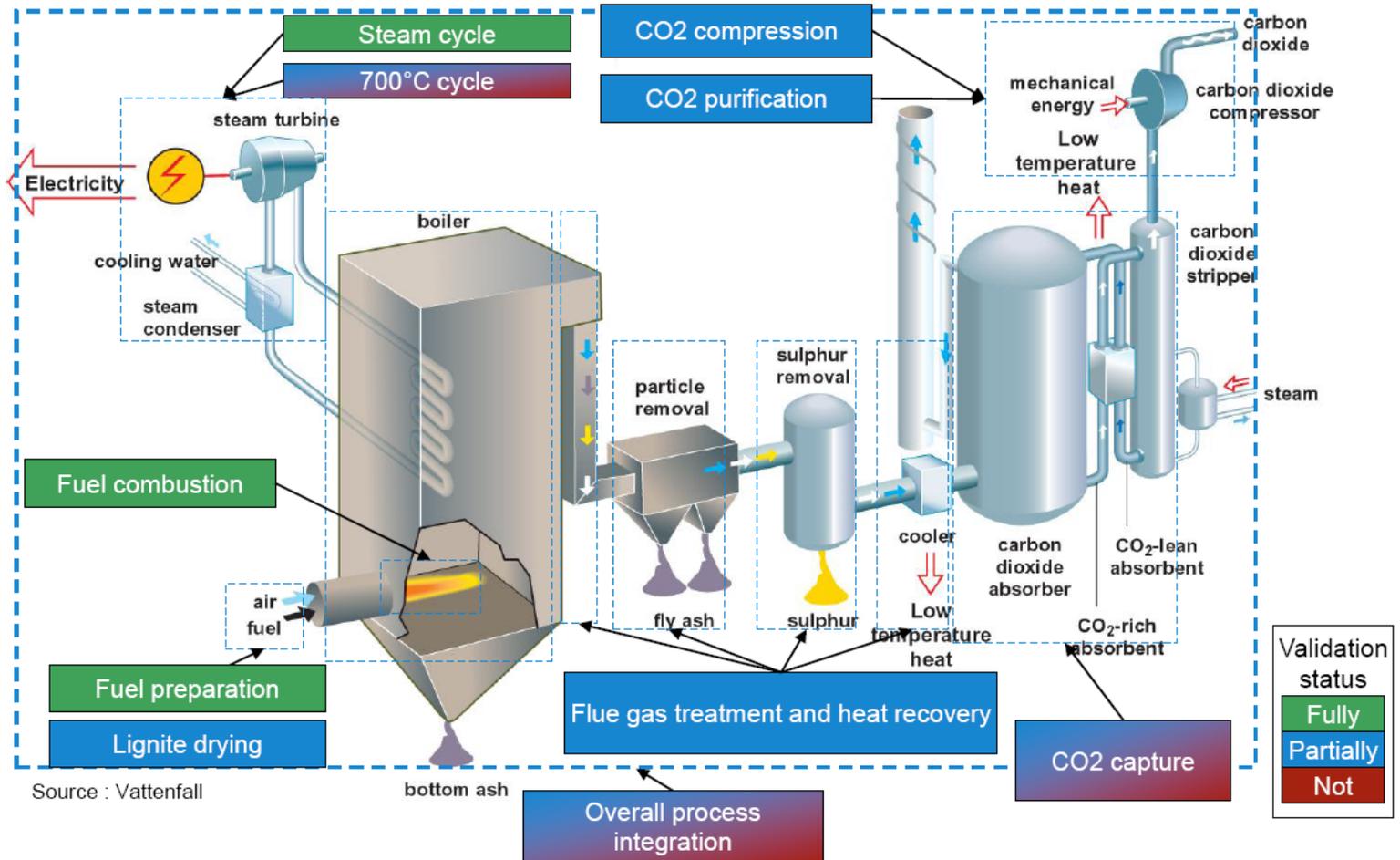
**Fernando Rubiera González**  
**[frubiera@incar.csic.es](mailto:frubiera@incar.csic.es)**





- **Tecnologías emergentes. Clasificación.**
  - **Post-combustión**
  - **Pre-combustión**
  - **Adsorción**
    - **Pre- and post-combustión**
  - **Tecnologías basadas en los óxidos de calcio**
    - **Gasificación + carbonatación / calcinación**
    - **Chemical Looping Combustion (CLC)**
  - **Utilización de membranas**

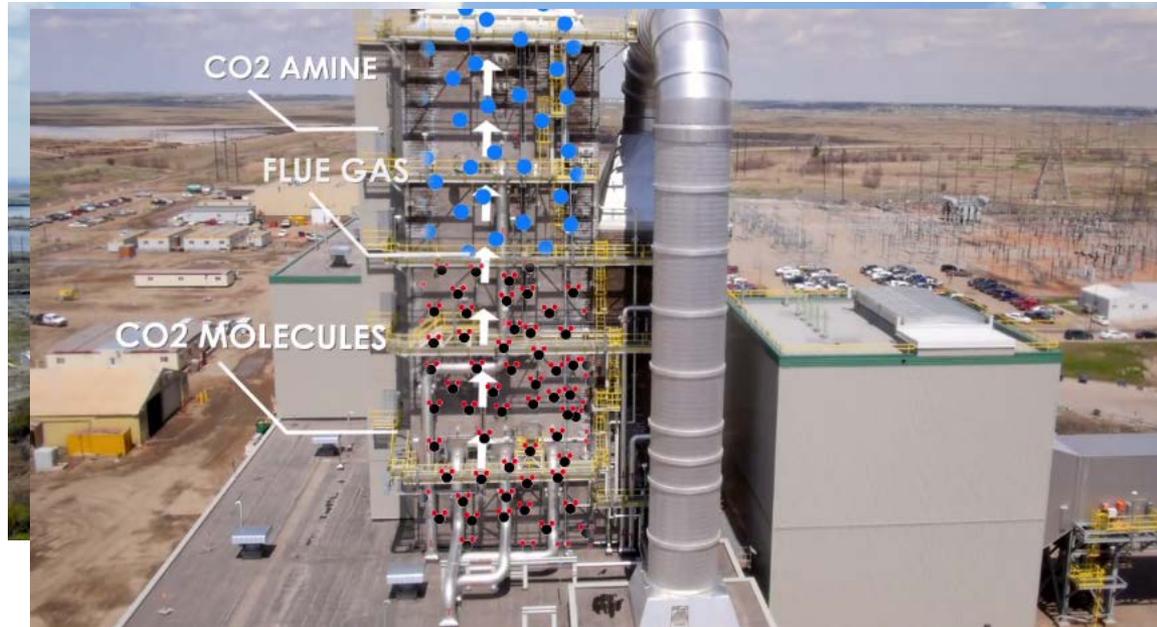
# Post-combustión en centrales térmicas de carbón



Validation status
Fully
Partially
Not

# Post-combustión en centrales térmicas de carbón

## Primera Planta Comercial de Captura de CO<sub>2</sub> en una Central Térmica de Carbón



- ✓ Boundary Dam (Canadá): 110 MWe; 1 Mt CO<sub>2</sub>/año.
- ✓ Comienzo de operación: 2 octubre 2014 (hasta Mayo de 2019 ha capturado 2.64 Mt).
- ✓ Para EOR (Weyburn, 66 km) o almacenamiento en acuífero salino (3.4 km profundidad, 2 km distancia).

# Post-combustión en centrales térmicas de carbón

## Petra Nova

The world's largest post-combustion carbon capture project



The Petra Nova 240 MWe carbon capture project at the WA Parish generating station, NRG Energy, southwest of Houston, Texas



Carbon capture facility. Absorber Tower in the foreground. Regenerator Tower next to it . Co-generation system at the top right



The CO<sub>2</sub> is used for EOR. Sent through this pipeline inlet at ~ 130 bar

Source: <http://www.nrg.com/generation/projects/petra-nova/>

# Post-combustión en centrales térmicas de carbón

## Petra Nova

The world's largest post-combustion carbon capture project

- ✓ Removes a significant portion of CO<sub>2</sub> from the flue gas stream.
- ✓ Petra Nova captures and concentrates CO<sub>2</sub> from the power plant's Unit 8 (650 MWe).
- ✓ Construction completed on-schedule in late 2016, on-budget and under budget.
- ✓ Petra Nova captures approximately 1.6 Mt/year of CO<sub>2</sub>.
- ✓ The Petra Nova project was officially inaugurated on April 13, 2017, by Governor Mike Pence and U.S. Secretary of Energy Rick Perry.

*"Carbon dioxide is not the primary cause of climate change".  
"Most likely the ocean waters and the environment are the main drivers".*

- ✓ Sent 129 km to the West Ranch oil field that was opened in the late 1930's and produced 50,000 bbl oil/day in the 1970's. Today it produces less than 300 bbl/day. With the injection of CO<sub>2</sub> by EOR they expect to produce 15,000 bbl/day and to recover 60 Mbbbl of oil that otherwise would be left underground and remain unrecovered.

# Dependencia Energética

## Consumo de energía primaria en España y grado de autoabastecimiento

Unidad: miles de toneladas equivalentes de petróleo

Consumo anual de energía primaria en España y grado de autoabastecimiento	Año 2016	Estructura (%)	Año 2015	Estructura (%)	Autoabastecimiento	
					2016	2015
Carbón	10.442	8,5	13.686	11,1	6,6	9,1
Petróleo	54.633	44,2	53.171	43,1	0,3	0,4
Gas natural	25.035	20,3	24.533	19,9	0,2	0,2
Nuclear	15.260	12,4	14.934	12,1	100,0	100,0
Energías renovables	17.212	13,9	16.659	13,5	100,0	100,0
Residuos no renovables	243	0,2	252	0,2	93,6 *	107,5 *
Saldo Eléctrico (Imp.-Exp.)	659	0,5	-11	^		
<b>Total</b>	<b>123.484</b>	<b>100,0</b>	<b>123.225</b>	<b>100,0</b>	<b>26,7</b>	<b>27,3</b>

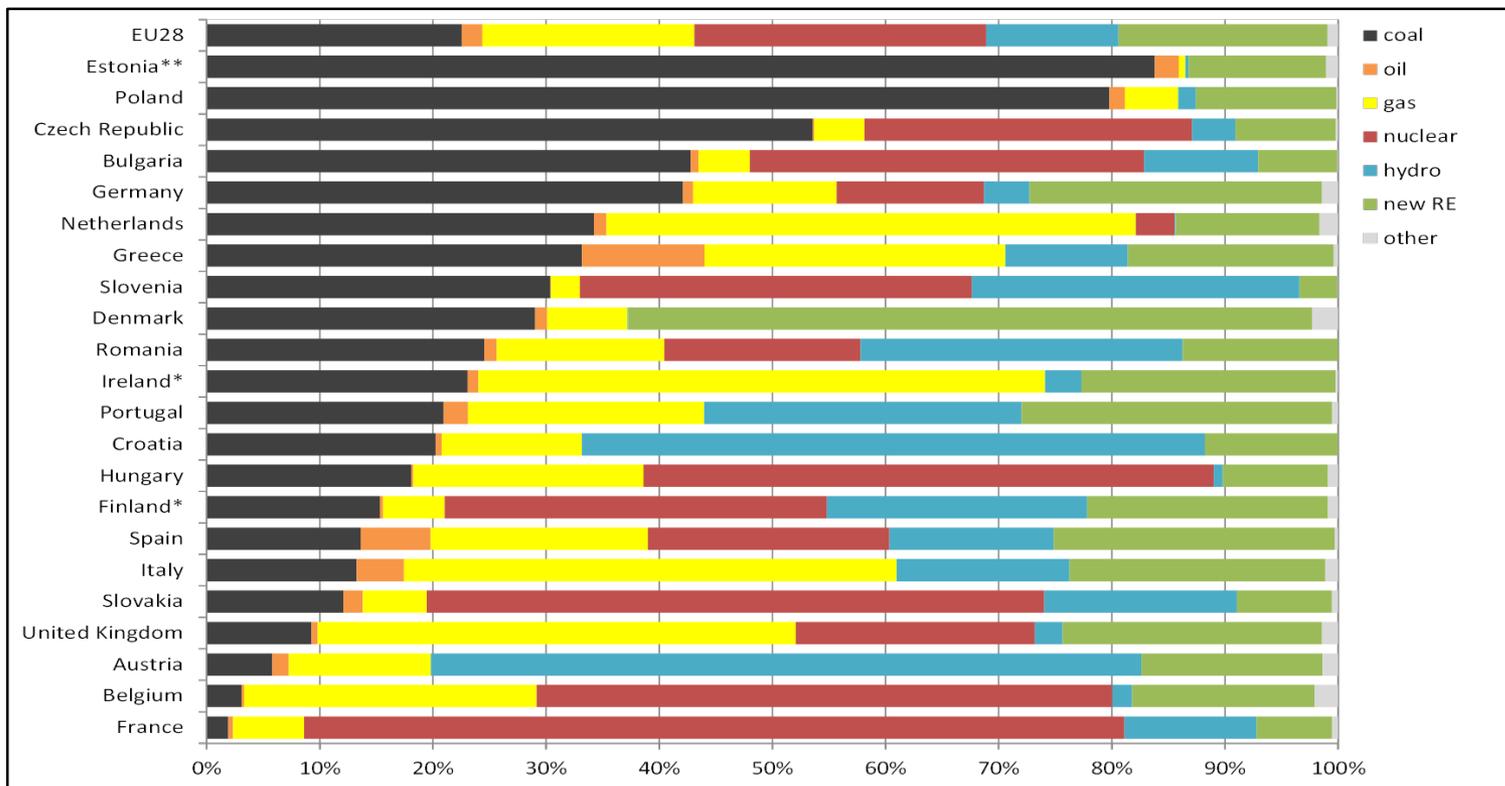
\* Este grado de autoabastecimiento corresponde a biomasa, biocarburantes y residuos

Fuente: D. G. de Política Energética y Minas

^ distinto de 0,0

Fuente: Boletín Estadístico de Hidrocarburos, Abril 2018

## Mix energético en la generación de energía eléctrica en la UE, 2016



Fuente: Eurostat database

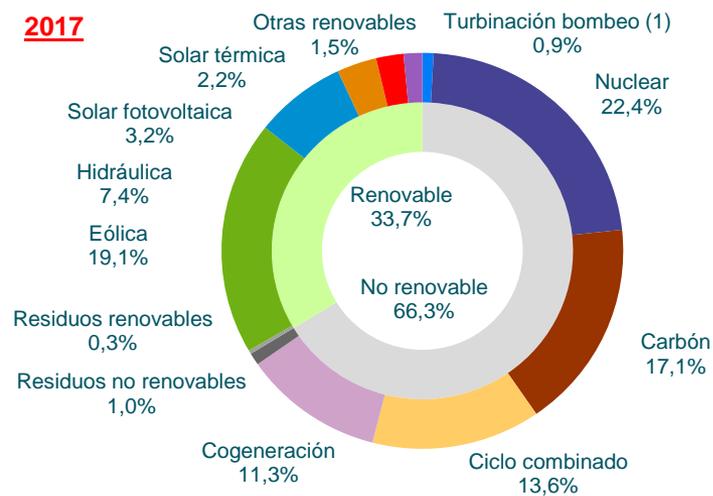


# Estructura de la generación eléctrica peninsular

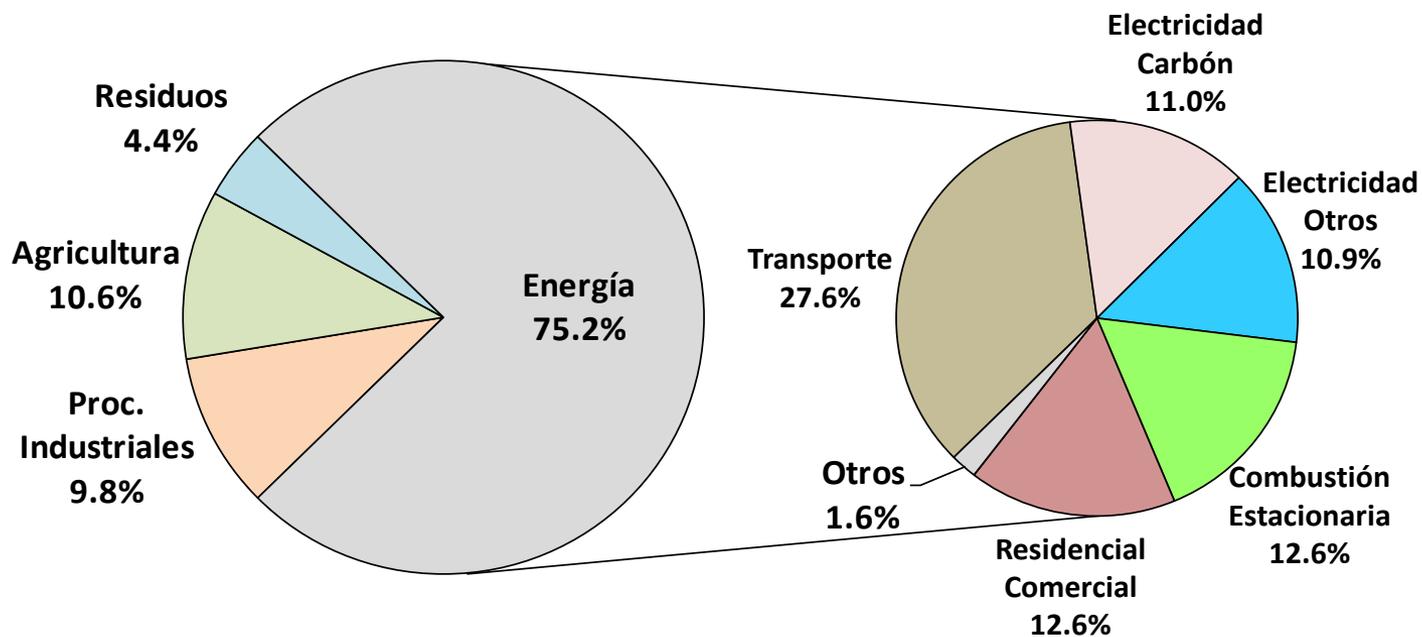
**2018**



**2017**



# Emisiones de CO<sub>2eq</sub> en España por sectores (2016)



Fuente: MAPAMA. Inventario Nacional de Emisiones de GEI 1990-2016. Abril 2018

Editorial



# Decarbonisation of the electricity sector? CCUS still imperative



Fernando Rubiera, Covadonga Pevida  
Department of Coal, Energy and Environment  
Instituto Nacional del Carbón, INCAR-CSIC,  
c/Francisco Pintado Fe, 26, 33011 Oviedo, Spain

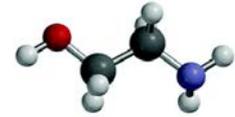
**T**here is an increasing move, mainly in developed countries, to phase-out coal in the power generation sector. This is particularly evident in many European countries that support Europe's policy to implement a low-carbon economy to comply with the objectives of the Paris Agreement. In this respect, it was remarkably significant the announcement of the UK Government plans to close all coal power plants by 2025 and it was followed by other countries like Austria, Belgium, Denmark, France, Italy, The Netherlands, Portugal and Sweden. While decarbonisation of the economy will have positive environmental implications to our society, the reduction of coal utilisation will be accompanied

Decarbonisation of the energy sector will be region-specific but

# Post-combustión en centrales térmicas

## Ventajas

- Tecnología de absorción muy madura en una gran variedad de aplicaciones industriales.
- Bajo precio (MEA~ 1000s €/t) y estabilidad de los solventes principales (Monoetanolamina, MEA, o N- metil-dietanol amina, MDEA).



MEA



MDEA

## Desventajas

- Se requiere pretratamiento de gases:  $\text{SO}_2$  (< 10 ppmv),  $\text{NO}_x$ , polvo... para proteger las aminas.
- Alta demanda de energía para regeneración del sorbente, (2.7-3.3 GJ/t $\text{CO}_2$ ).
- Carácter corrosivo de las soluciones más concentradas en amina.
- Impacto ambiental de productos minoritarios de degradación con  $\text{O}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , alta T..(amidas, aldeidos, nitrosaminas..) y de la propia MEA.



# Post-combustión en centrales térmicas

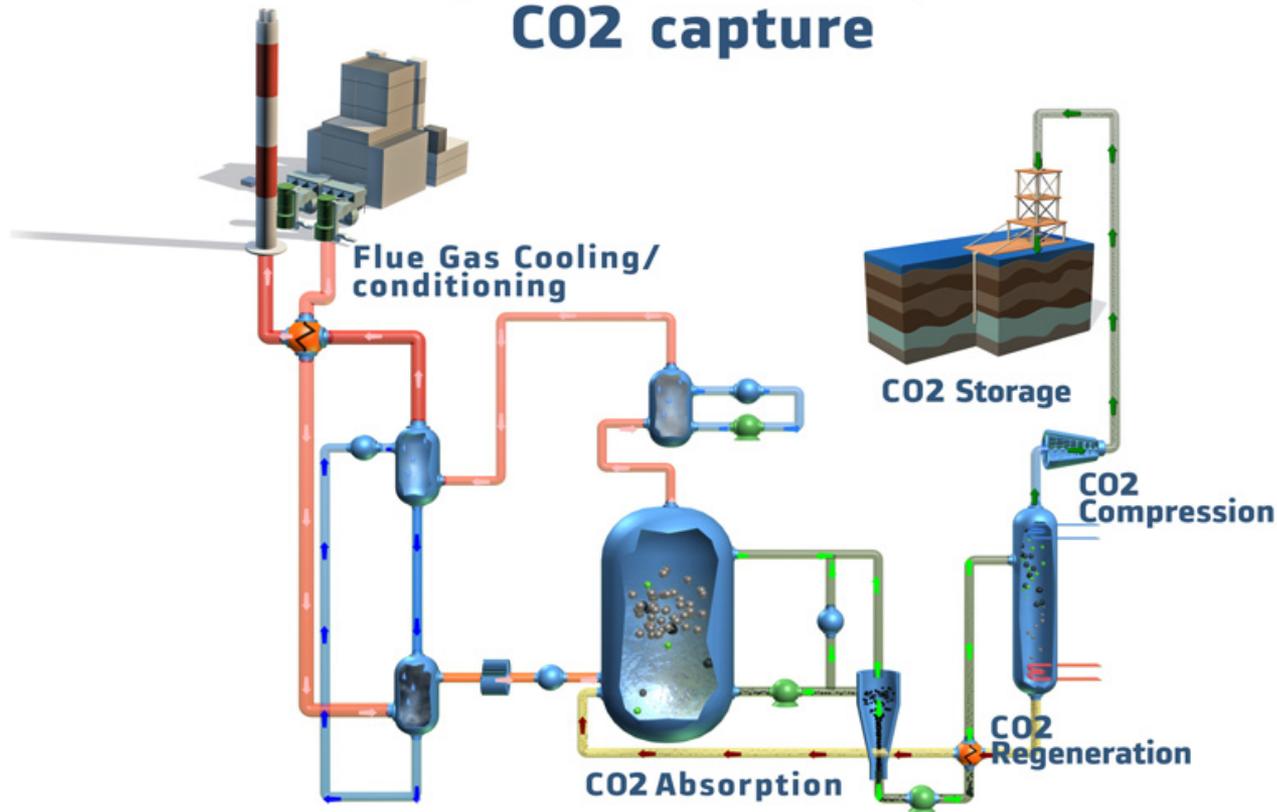
---

## Mejoras a través de I+D+demo

- **Nuevas columnas de absorción: mejora contacto Gas/Líquido y menor pérdida de carga.**
- **Utilización de reciclos de gas de combustión para aumentar concentración de CO<sub>2</sub> (solo en sistemas de postcombustión aplicados a ciclos de gas natural).**
- **Mejoras en la integración energética del sistema completo de captura.**
- **Aditivos para reducir la degradación de MEA, y corrosión de materiales a elevada concentración de amina.**
- **Nuevos solventes, o mezclas de ellos, intentando reducir requerimientos energéticos en regeneración (AMP, DEA, MDEA, PZ, AMPD, THAM...NH<sub>3</sub>).**
- **Catalizadores durante la regeneración para permitir velocidades de reacción más rápidas a temperaturas inferiores de regeneración.**

# Ejemplo procesos emergentes post-combustión con solventes: Procesos de absorción basados en NH<sub>3</sub>

## Chilled Ammonia CO<sub>2</sub> capture



ALSTOM

pteco<sub>2</sub>  
Plataforma Tecnológica Española del CO<sub>2</sub>

# Ejemplo procesos emergentes post-combustión con solventes: Procesos de absorción basados en $\text{NH}_3$

## Ventajas

- Captura de  $\text{SO}_2$  y  $\text{CO}_2$ .
- Solvente muy estable ( $\text{NH}_3$ ), barato y no corrosivo.
- Bajos requerimientos energéticos para la regeneración. Menor energía en compresión ( $\text{PCO}_2 \sim 20$  bar a  $T \sim 120$  °C del regenerador).

## Desventajas

- $\text{NH}_3$  es más volátil que las aminas (necesidad de trabajar a baja T, 0-10°C).
- Consumos energéticos extra para refrigeración de todo el gas de combustión.
- Manejo de “slurries” de  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  (s).

	MEA	$\text{NH}_3$
<b>Molecular weight</b>	61	17
<b>Practical <math>\text{CO}_2</math> loading (kg/kg solution)</b>	0.05	0.1-0.2
<b>Heat of reaction (kcal/mol)</b>	20-22	6-8
<b>Absorption temperature (°C)</b>	40-70	0-10
<b>Regeneration temperature (°C)</b>	110-130	110-130
<b>Regeneration pressure (bar)</b>	1-1.5	20-40
<b><math>\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2</math> in regenerator gas outlet (mol)</b>	1-1.5	0.01-0.05
<b>Make up requirement (kg/t <math>\text{CO}_2</math>)</b>	2	0.2
<b>Make up cost (\$/t)</b>	1000-1500	200-300

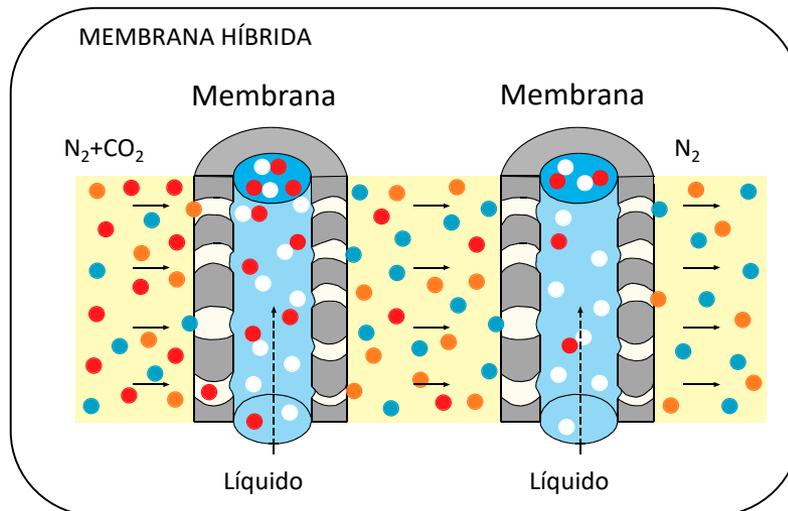
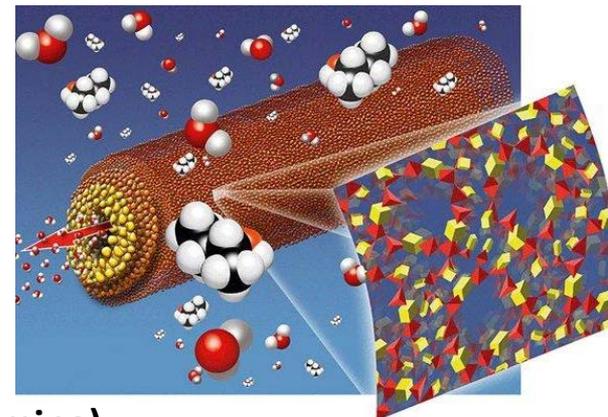


Alstom 20 MW  
Pilot Plant  
AEP  
Mountaineer  
West Virginia  
(USA)

# Membranas para Post-combustión

## Tipos de membranas

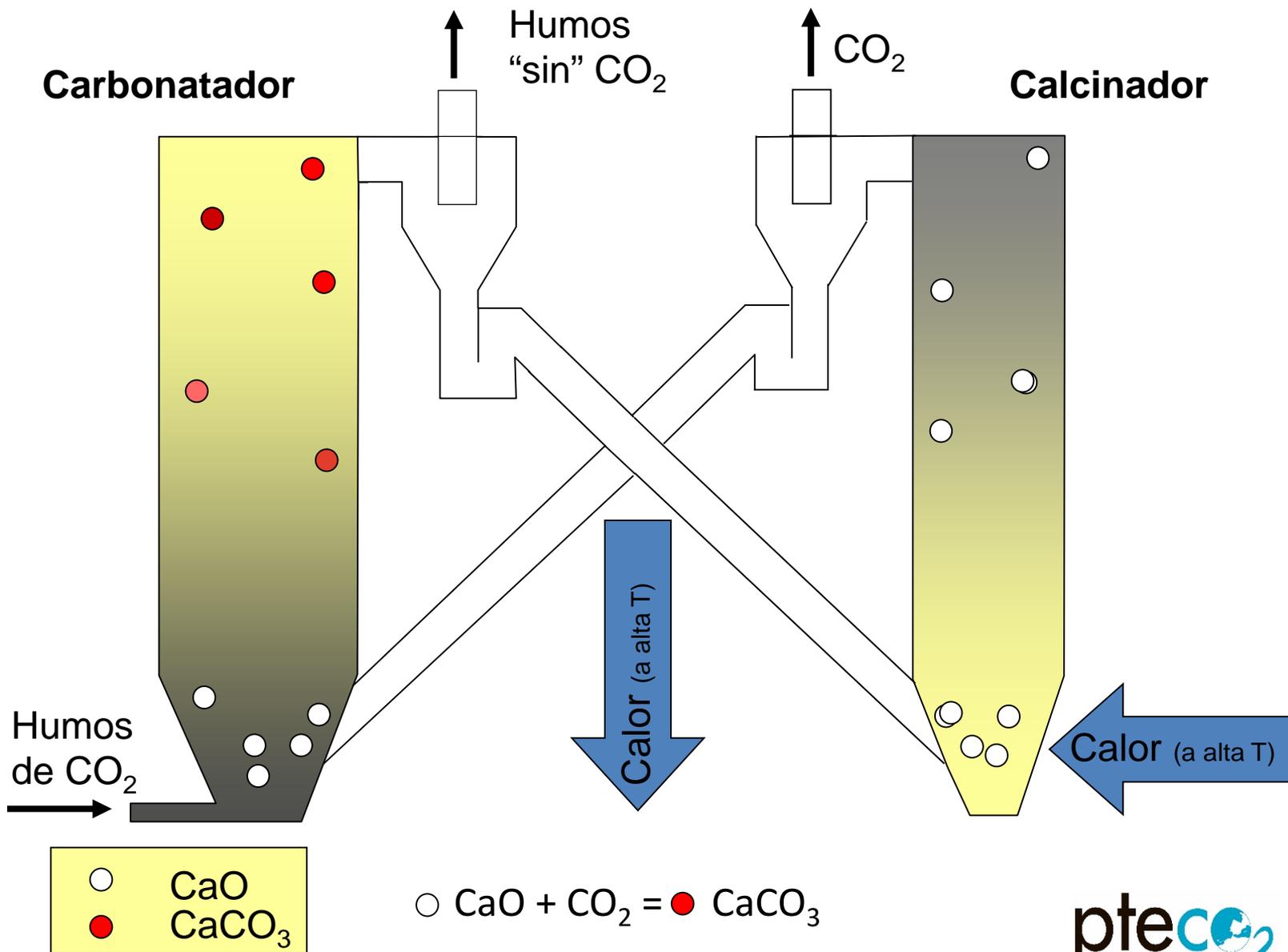
- Membranas poliméricas (policarbonatos, polisulfonas, poli-imidas)
- Membranas híbridas
  - Membranas de absorción (membrana+amina)
  - Membrana facilitadora de transporte (carbonatos, hidratos, amina soportada...)



## Ventajas y Desventajas

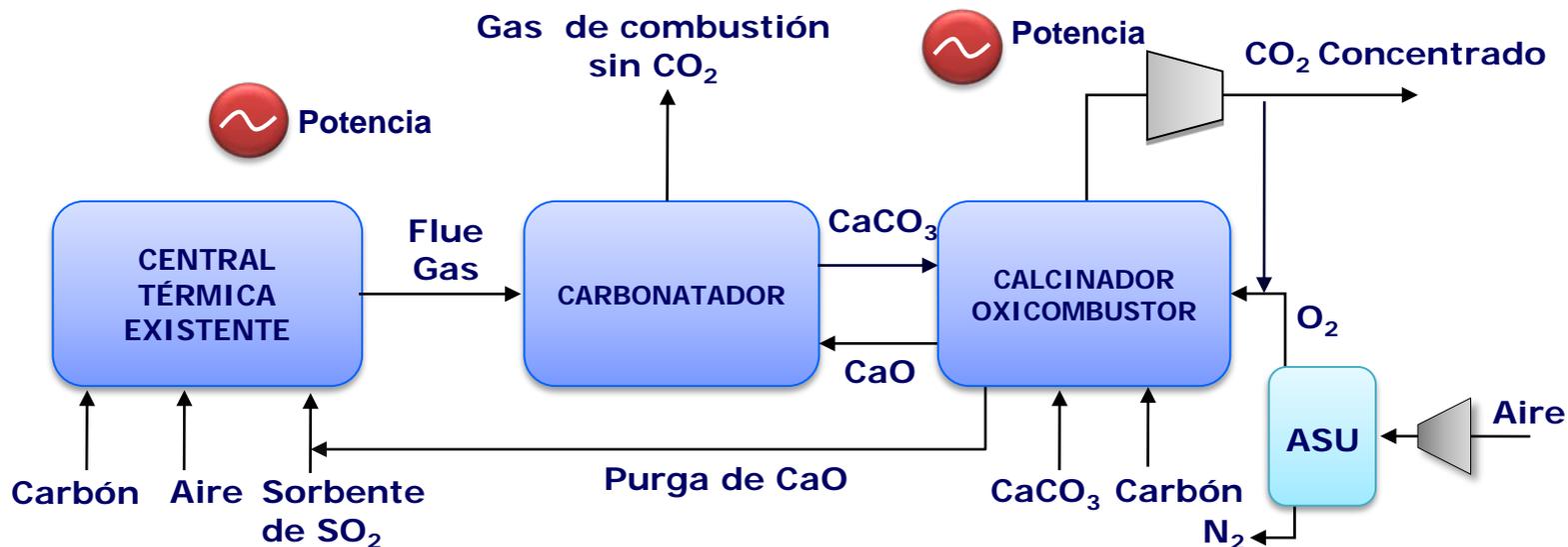
- Elementos modulares: muy compactas y de fácil escalado.
- Se requieren gases muy limpios (sin  $SO_2$ ,  $NO_x$ , poco  $O_2$ ) para evitar degradación (i.e., difícil aplicación gases central carbón).

# Captura de CO<sub>2</sub> por Carbonatación-Calcinación



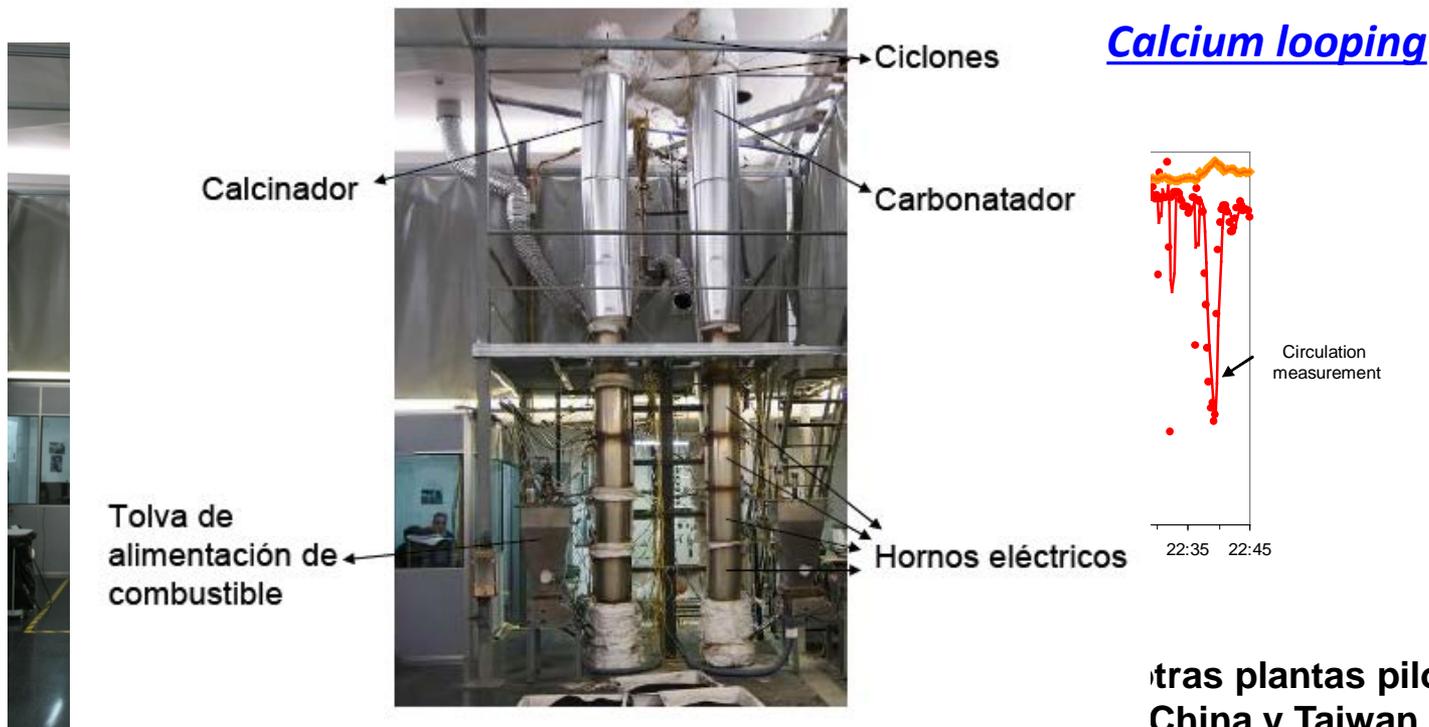
# Captura de CO<sub>2</sub> por Carbonatación-Calcinación

## Calcium Looping



- ✓ Low energy penalty (6-8 net points) and low cost per ton CO<sub>2</sub> captured
- ✓ Low cost sorbent precursor
- ✓ Purge of CaO: synergies with cement industry and others (i.e., desulfurization)
- ✓ Pre-treatment of flue gas no needed (SO<sub>2</sub> co-capture)
- ✓ Suitable for retrofitting to existing power plants

# Planta piloto de 30 kW<sub>th</sub> del INCAR-CSIC



- Seis patentes o solicitudes de patente
- Los trabajos científicos más citados en el mundo en este campo
- Primeros resultados en el mundo en planta piloto en continuo, diseño y construcción propias (2008)
- Primeros resultados en planta piloto a escala semi-industrial de 1.7 MWt (2012).

# Plantas piloto de Calcium looping (>200 kW<sub>th</sub>)

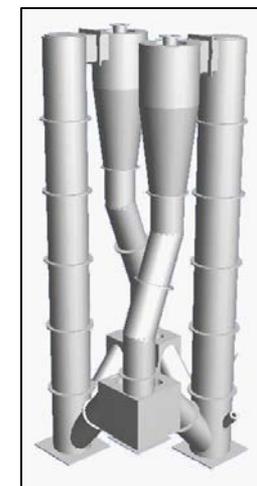
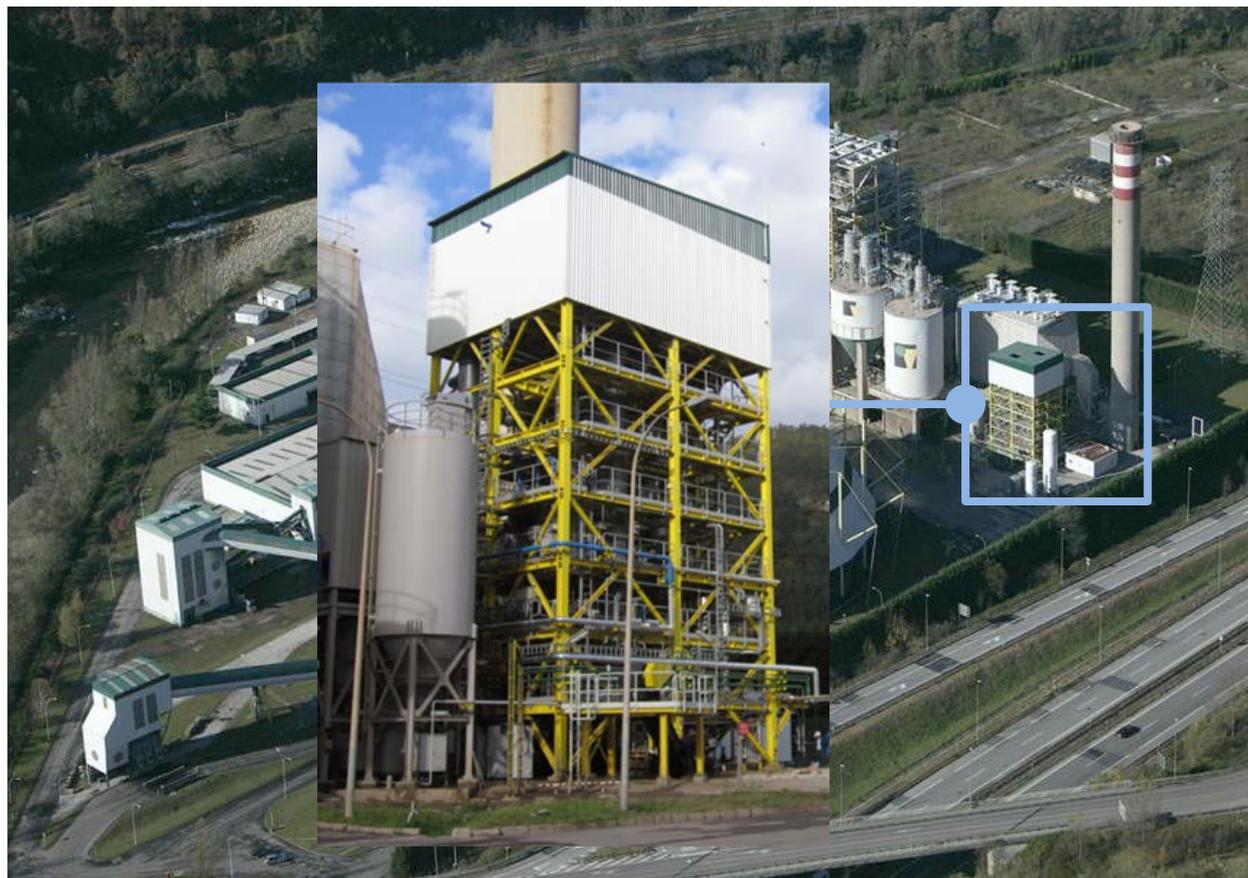
	La Pereda (Spain)	Darmstad (Germany)	IFK (Germany)	La Robla (Spain)	ITRI (Taiwan)
Thermal input	1.7 MW <sub>th</sub> referred to carbonator	1 MW <sub>th</sub> referred to calciner	50-230 kW <sub>th</sub> referred to carbonator	300 kW <sub>th</sub> referred to the biomass fed to carbonator	1.9 MW <sub>th</sub> (1 t <sub>CO2</sub> /h)
Configuration	Calciner: CFB Carbonator: CFB	Calciner: CFB Carbonator: CFB	Calciner: CFB Carbonator: FFB* and TFB*	Calciner: CFB Carbonator: CFB	Calciner: rotary kiln Carbonator: FB
Height	Calciner: 15 m Carbonator: 15 m	Calciner: 11.4 m Carbonator: 8.6 m	Calciner: 10 m Carbonator: 10 m (FFB*), 6 m (TFB*)	Calciner: 12 m Carbonator: 12 m	Calciner: 5m (length) Carbonator: 2.5m
Diameter	Calciner: 0.75 m Carbonator: 0.65 m	Calciner: 0.4 m Carbonator: 0.59 m	Calciner: 0.21 m Carbonator: 0.21 m (FFB±), 0.33 m (TFB±)	Calciner: 0.4 m Carbonator: 0.4 m	Calciner: 0.9 m Carbonator: 3.3 m
Control of solid flow	Cone valves	Screw conveyors	Cone valves	On:Off loop seal	Kiln rotation speed
Flue gas source	Integrated with power plant	Flue gas from coal burner	Synthetic flue gas	Flue gas generated in carbonator	Integrated with the cement plant
Calciner operation	Oxy-fired with coal	Oxy-fired with coal/propane	Oxy-fired with coal and flue gas recycle	Air-fired with biomass	Oxy-fired with diesel
Project name or website	<a href="http://recal-project.eu/">http://recal-project.eu/</a> ; <a href="http://cao2.eu">http://cao2.eu</a>	<a href="http://www.project-scarlet.eu/">http://www.project-scarlet.eu/</a>	<a href="http://cal-mod.eu-projects.de/">http://cal-mod.eu-projects.de/</a>	MenosCO2	HECLOT

From:

Abanades et al, *Emerging CO<sub>2</sub> capture systems*. Int. J. Greenhouse Gas Control, 2015, vol 40, 126-166 [doi:10.1016/j.ijggc.2015.04.018](https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.04.018)

# Captura de CO<sub>2</sub> por Carbonatación-Calcinación

Planta piloto de 1.7 MWt en la CT "La Pereda", Asturias



Reactores:  
15 m altura,  
0.7 m d.i.

 endesa generación

  
grupohunosa

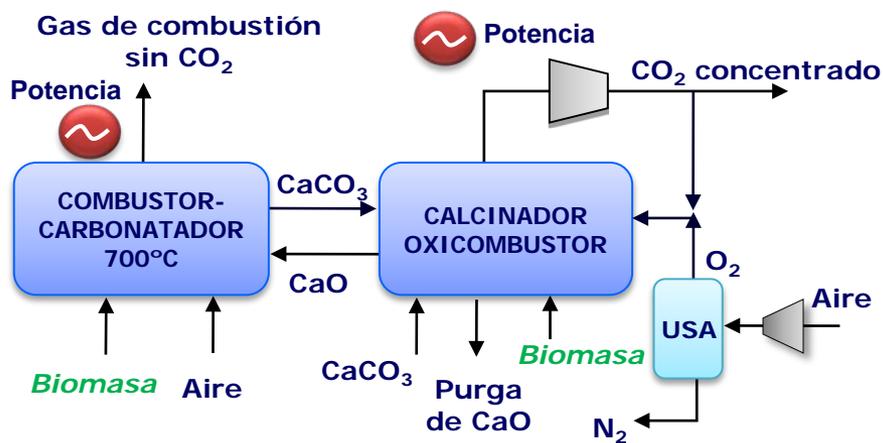
 MINISTERIO  
DE ECONOMÍA, INDUSTRIA  
Y COMPETITIVIDAD

 **CSIC**  
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS  
INSTITUTO NACIONAL  
DEL CARBÓN

  
Plataforma Tecnológica Española del CO<sub>2</sub>

# Captura de CO<sub>2</sub> por Carbonatación-Calcinación

## Planta piloto de 300 kWt en la Robla, León



- Variante del proceso de carbonatación-calcinación, con liderazgo y patentes españolas: planta piloto de la Robla de Gas Natural Fenosa, 2 LFC conectados de 12 m altura.
- Proyecto MENOS CO<sub>2</sub>: combustión de biomasa en aire a una temperatura baja (de unos 700 °C) en presencia de CaO, capturando el CO<sub>2</sub> por carbonatación en el mismo lecho de combustión.
- Este concepto implica emisiones negativas cuando se almacena geológicamente el CO<sub>2</sub> generado en el oxicalcinador.

gasNatural  
fenosa



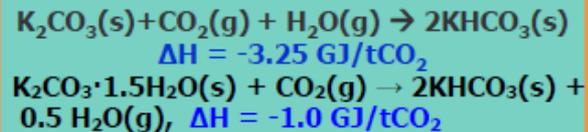
pteco<sub>2</sub>  
Plataforma Tecnológica Española del CO<sub>2</sub>

# Captura de CO<sub>2</sub> post-combustión con sorbentes sólidos: KIER (Korea Institute of Energy Research)

## Proyecto de Captura Post-combustión de 10 MWe (Hadong, Corea)

### Características del sorbente sólido

#### Carbonation

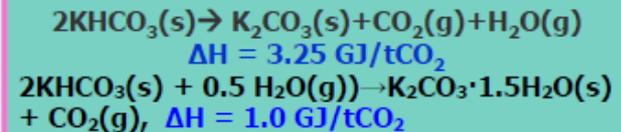


Operating temperature: 40-80°C

- No Volatile
- No waste water
- Little Corrosion

- Easy to control heat for exothermic reaction

#### Regeneration



Operating temperature: 140-200°C

- Recover high-concentrated CO<sub>2</sub> after condensing H<sub>2</sub>O

- Use waste heat, steam for endothermic reaction

- Solid sorbents for fluidized-bed applications
  - High sorption capacity
  - High mechanical strength

# Captura de CO<sub>2</sub> post-combustión con sorbentes sólidos: KIER (Korea Institute of Energy Research)

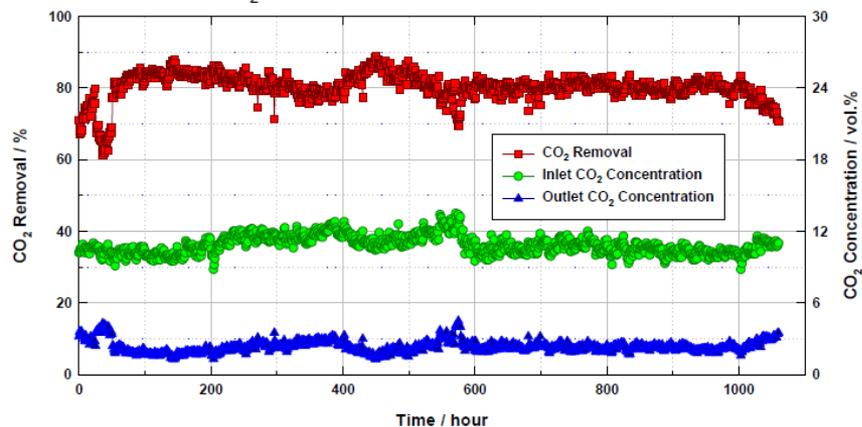
## Proyecto de Captura Post-combustión de 10 MWe (Hadong, Corea)



10 MW Pilot Plant at KOSPO's Hadong coal-fired power plant, Unit # 8

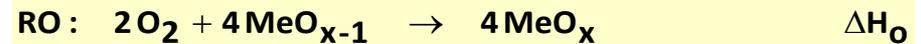
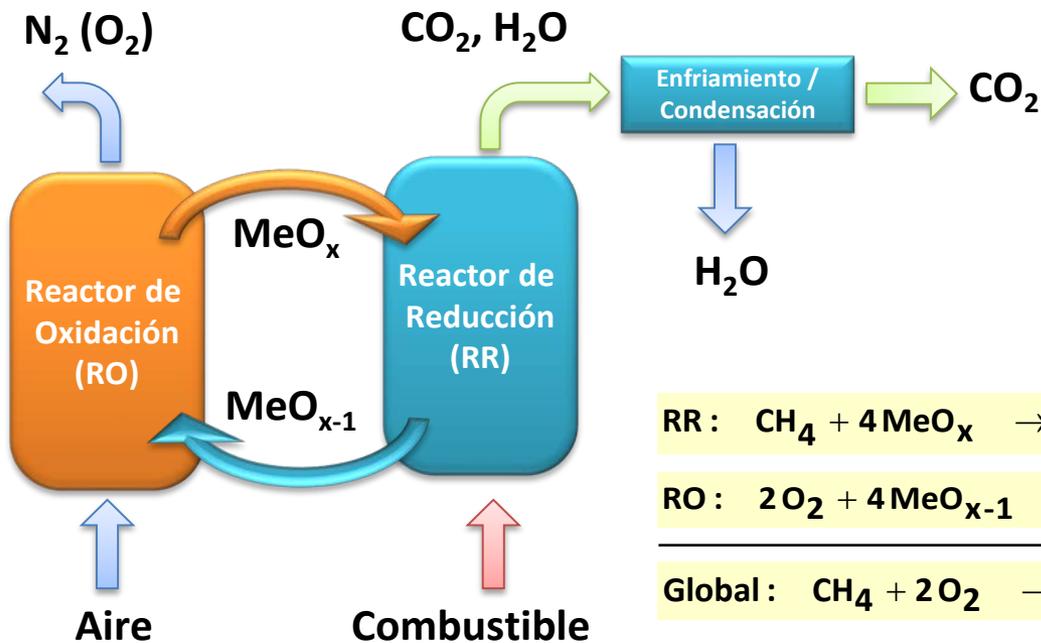
- ❑ Scale: 10 MW slip-streamed from 500 MW coal-fired power plant(SC)
- ❑ Capacity: 200 tCO<sub>2</sub>/d
- ❑ Flue gas: coal-fired boiler
- ❑ Sorbent: KEP-CO2P2
- ❑ Achievement
  - > 80% CO<sub>2</sub> capture rate
  - 95% CO<sub>2</sub> purity
  - Completed 1000 h continuous operation
- ❑ Targets:
  - 20% capital cost reduction
  - 20% cost reduction (<US\$ 40/tCO<sub>2</sub>)
- ❑ Startup: October, 2013
- ❑ Plot area: 34 (L) x 15 (W) x 59 m(H)
- ❑ Location: Hadong, Korea. KOSPO's Hadong Thermal Power Station (unit #8)

Pilot Unit – CO<sub>2</sub> Removal Performance

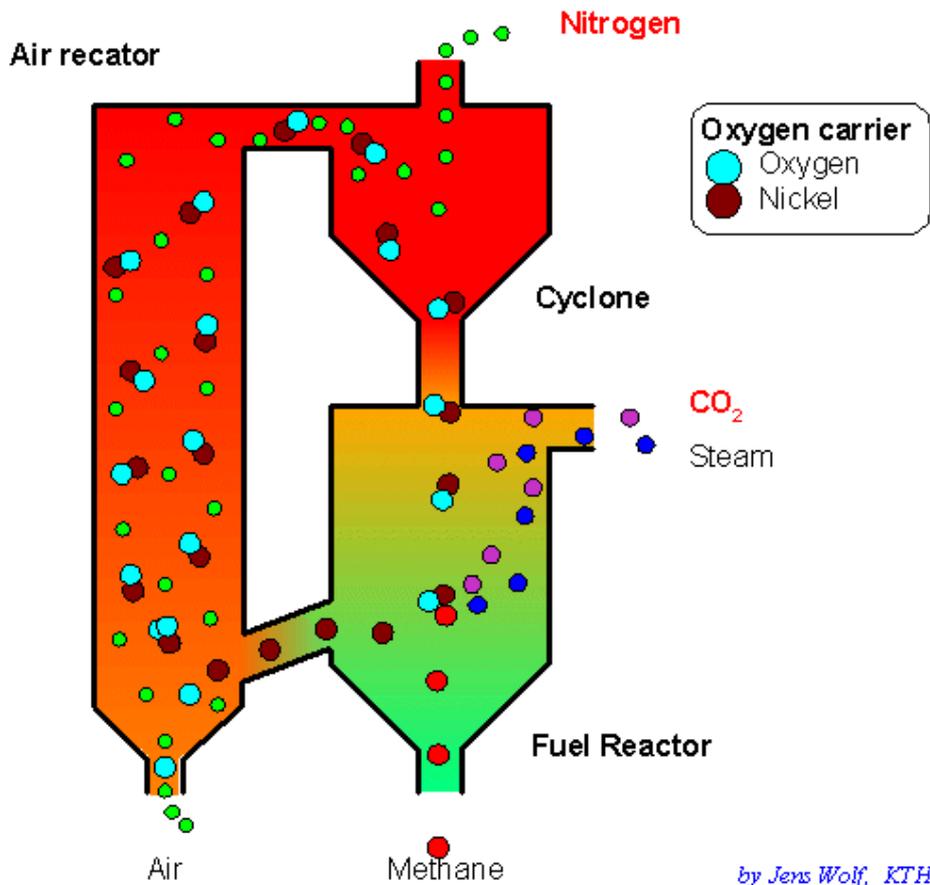


# Chemical Looping Combustion

- En la década de los 90 se empezó a desarrollar la **combustión con transporte de oxígeno** (*Chemical Looping Combustion, CLC*).
- En CLC se **transfiere oxígeno del aire al combustible** por medio de un transportador de oxígeno, normalmente en forma de óxido metálico, por lo que el  $N_2$  del aire no se mezcla nunca con el combustible.



# Chemical Looping Combustion



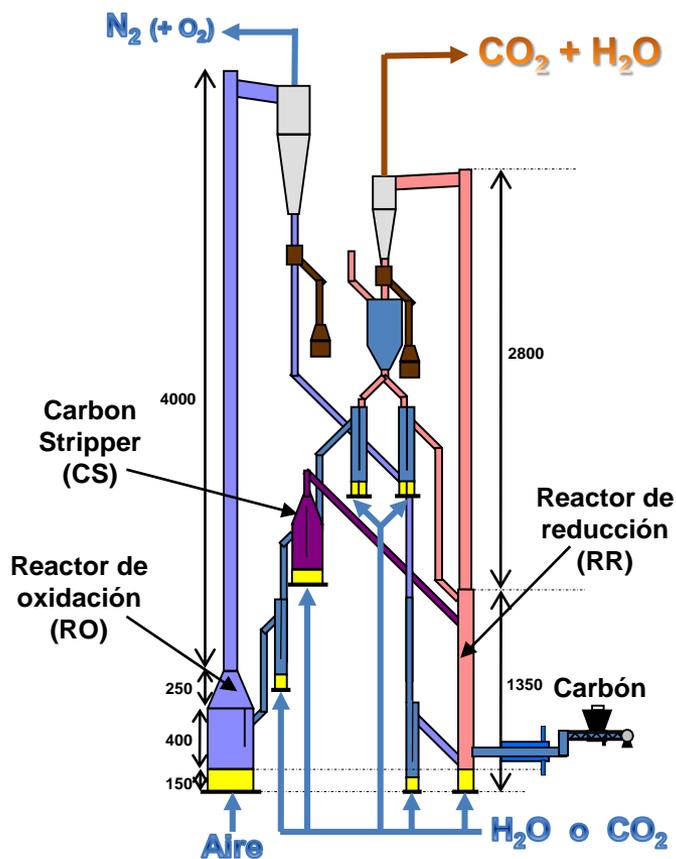
10 kW CLC, Chalmers (2003)



10 kW CLC, ICB - Zaragoza

# Chemical Looping Combustion

Planta piloto de 50 kWt (Instituto de Carboquímica, ICB-CSIC)



**Chemical-Looping with Oxygen Uncoupling (CLOU). Combustión con sólidos productores de oxígeno gas (Patente del ICB-CSIC)**

# Captura de CO<sub>2</sub> mediante Adsorción

## Adsorbentes

La captura de CO<sub>2</sub> por adsorción con sólidos implica un proceso cíclico en el que el CO<sub>2</sub> es adsorbido selectivamente sobre la superficie del sólido el cual es sometido a una etapa posterior de regeneración en la cual se desorbe el CO<sub>2</sub> capturado. Los adsorbentes pueden ser inorgánicos (zeolitas, MOF, óxidos metálicos, etc.) u orgánicos (carbones activados, tamices moleculares de carbono, poliméricos, etc.)

### Adsorción de CO<sub>2</sub>

Física  
(van der Waals-electrostáticas)

Química  
(covalente)

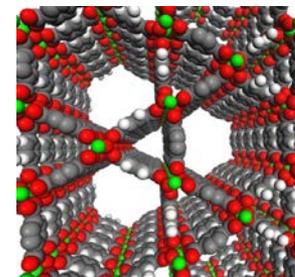
- Comercial para purificación de H<sub>2</sub>
- Potencial para captura pre y post-combustión
- Objetivos: elevada capacidad y bajo coste



# Tecnologías de Adsorción – Adsorbentes

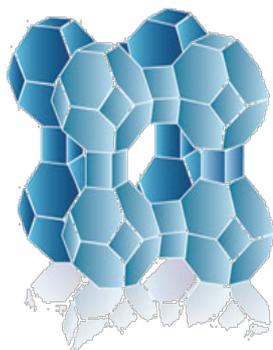
## *Metal-Organic Frameworks (MOF)*

Compuestos cristalinos formados por iones metálicos unidos por ligantes orgánicos formando estructuras porosas. Se utilizan como tamices moleculares y para almacenamiento de gases. Porosidad elevada



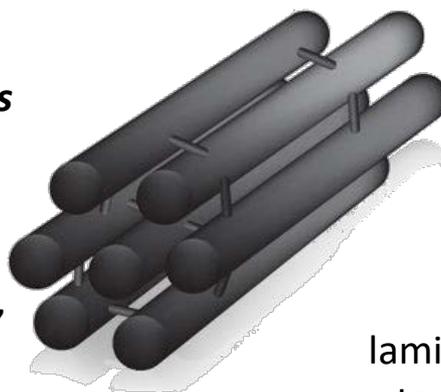
## *Zeolitas*

Aluminosilicatos hidratados que forman estructuras porosas regulares las cuales les confieren propiedades de tamiz molecular. Pueden ser modificadas por intercambio iónico para incorporar cationes metálicos los cuales modifican significativamente su capacidad de adsorción de CO<sub>2</sub>, su selectividad y su tolerancia al agua.



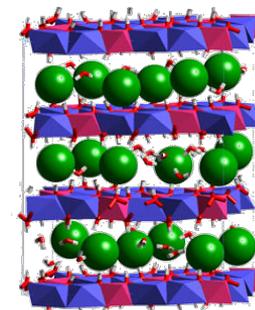
## *Carbonosos*

Se incluyen desde carbones activados hasta tamices moleculares de carbono. Son menos sensibles a la humedad, fácilmente regenerables y relativo bajo coste.

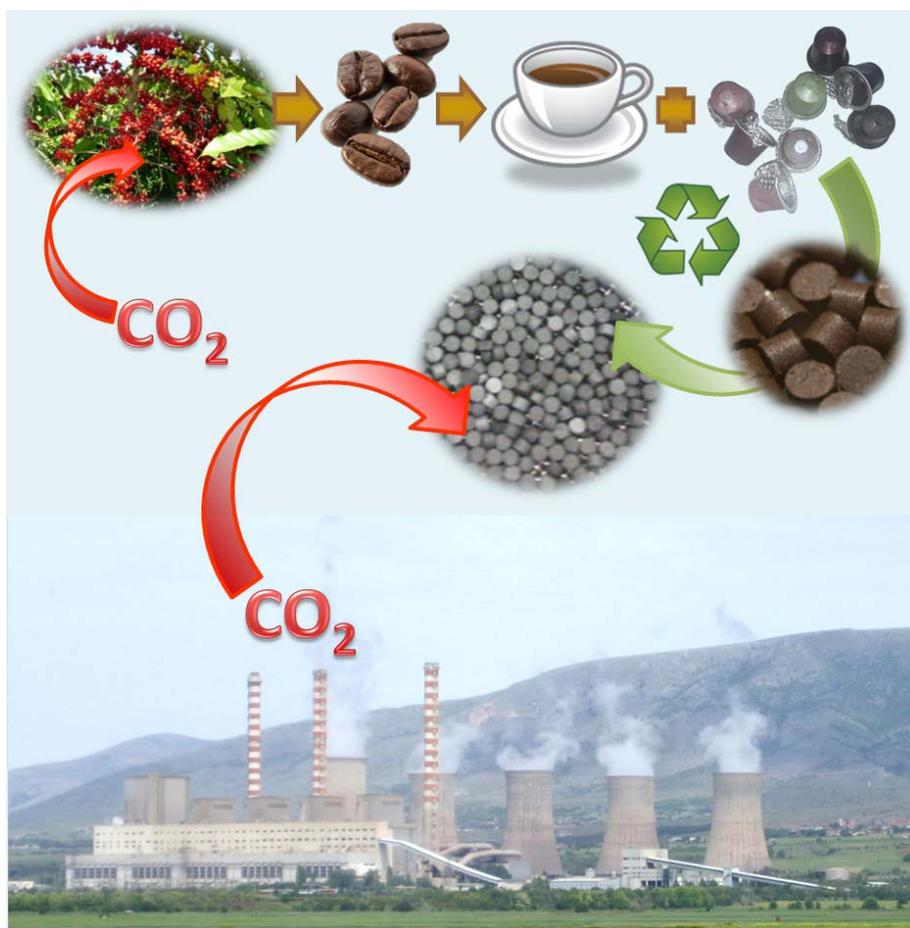


## *Hidrotalcitas*

Hidróxidos dobles laminares. Adsorben CO<sub>2</sub> a temperaturas elevadas.



# Tecnologías de Adsorción – Sorbentes Biomásicos



## Biomasa

- ⊕ Sumidero de CO<sub>2</sub>.
- ⊕ Disponible globalmente.
- ⊕ Barata.
- ⊕ Fuente renovable de carbono.

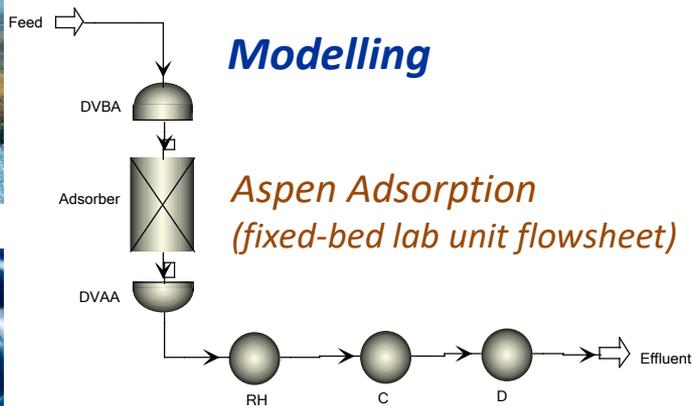
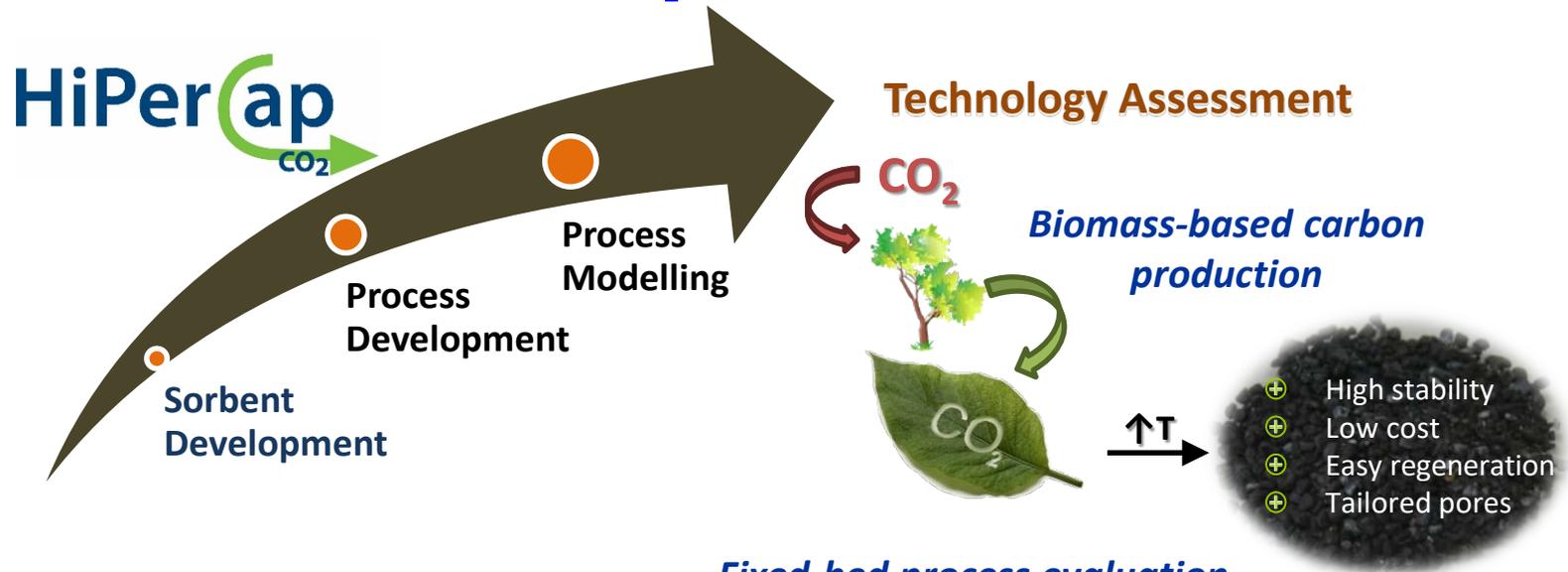
## Carbón activo: Pélets de residuos de café

- ⊕ Elevada estabilidad.
- ⊕ Bajo coste.
- ⊕ Fácilmente regenerable.
- ⊕ Control del tamaño de partícula, porosidad y tamaño de poro, y química superficial.

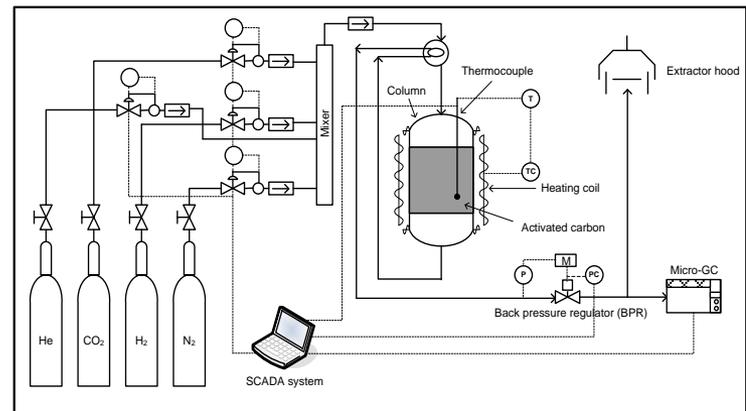
- Patent filed <sup>[1]</sup> : Procedure to obtain a CO<sub>2</sub> adsorbent from spent coffee grounds, P201331003. CSIC, 2013
- M.G. Plaza, A.S. González, C. Pevida, F. Rubiera. Green coffee based CO<sub>2</sub> adsorbent with high performance in postcombustion conditions. *Fuel*. 2015;140:633-48

# Tecnologías de Adsorción – Sorbentes Biomásicos

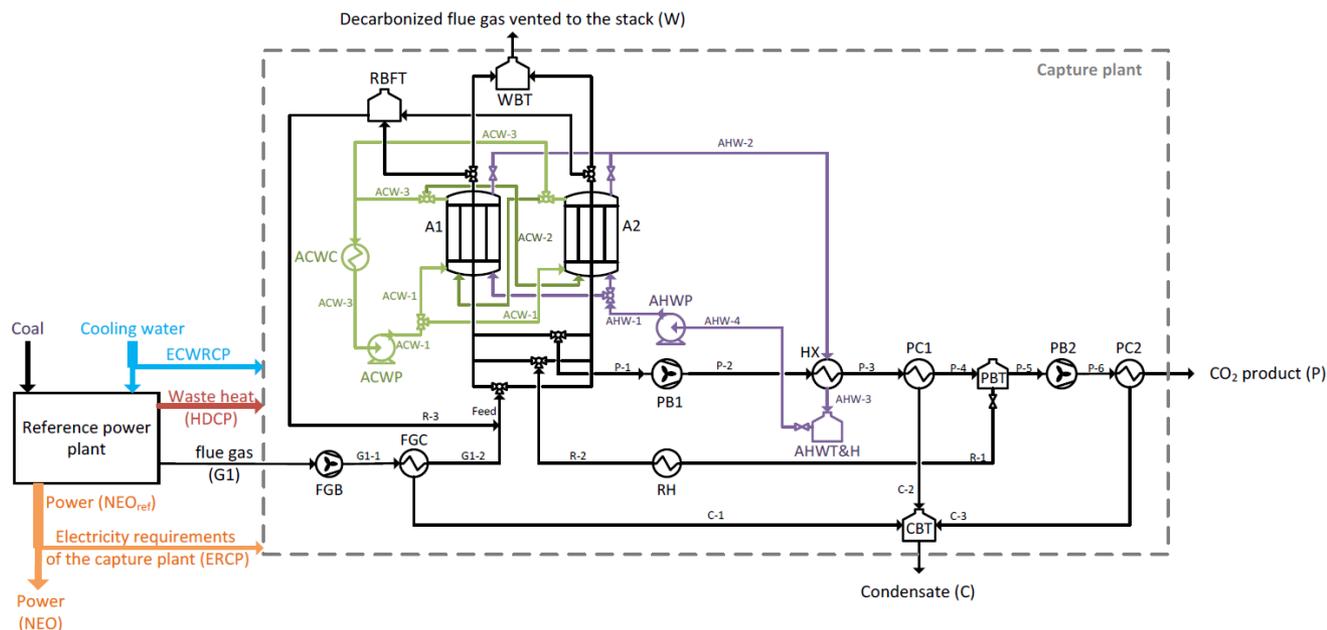
Prove adsorption with low-temperature solid sorbents as a high efficiency and environmentally benign technology for post-combustion CO<sub>2</sub> capture by means of experimental and modelling work



## Fixed-bed process evaluation



# Tecnologías de Adsorción – Sorbentes Biomásicos



**Table 3**

Comparison of post-combustion CO<sub>2</sub> capture processes using a common reference power plant and a similar set of assumptions.

Parameter	VTCSA <sup>a</sup>	VTSA <sup>b</sup>	TCSA <sup>c</sup>	Advanced solvent <sup>d</sup>	Units
Purity of the CO <sub>2</sub> product	95	95	96	≥ 95	% mol, dry basis
CO <sub>2</sub> capture rate	85	85	85	90	%
Specific heating duty	2.32	2.41	3.59	3.02	MJ <sub>th</sub> kg <sup>-1</sup> CO <sub>2</sub>
Specific cooling duty	3.24	3.00	3.36	3.98	MJ <sub>th</sub> kg <sup>-1</sup> CO <sub>2</sub>
Specific electricity requirements	0.66	1.15	0.13	0.09	MJ <sub>e</sub> kg <sup>-1</sup> CO <sub>2</sub>
SEPAC <sup>e</sup>	0.66	1.15	NA	0.78	MJ <sub>e</sub> kg <sup>-1</sup> CO <sub>2</sub>
Productivity	0.35	0.32	0.40	–	kg <sub>CO2</sub> kg <sub>adsorbent</sub> <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>
Total mass of adsorbent	1437	1539	1256	–	t

Fuente: - Plaza & Rubiera, *Applied Energy*, 250, 916 (2019)  
 - Plaza & Rubiera, *Chem. Eng. J.*, 375, 122002 (2019)

# Tecnologías de Adsorción – Aplicación Comercial

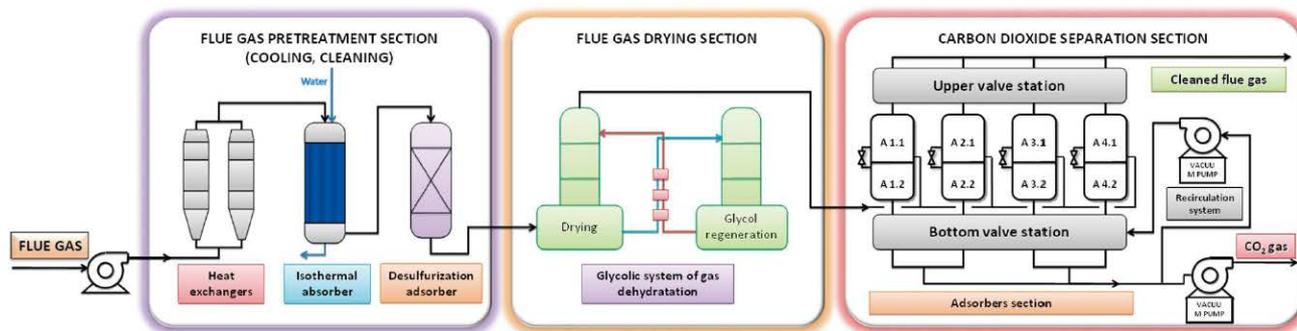
## Vacuum-pressure swing adsorption (VPSA) CO<sub>2</sub> capture pilot installation



### Technical characteristics of the installation

Feed gas stream:	100 m <sup>3</sup> /h
CO <sub>2</sub> concentration in flue gas:	ca. 13%
CO <sub>2</sub> recovery:	min. 90%
CO <sub>2</sub> concentration in the product:	min. 60%
Adsorption pressure:	max 160kPa abs.
Desorption pressure:	min 20 kPa abs.
Electrical energy demand:	20.8 kW

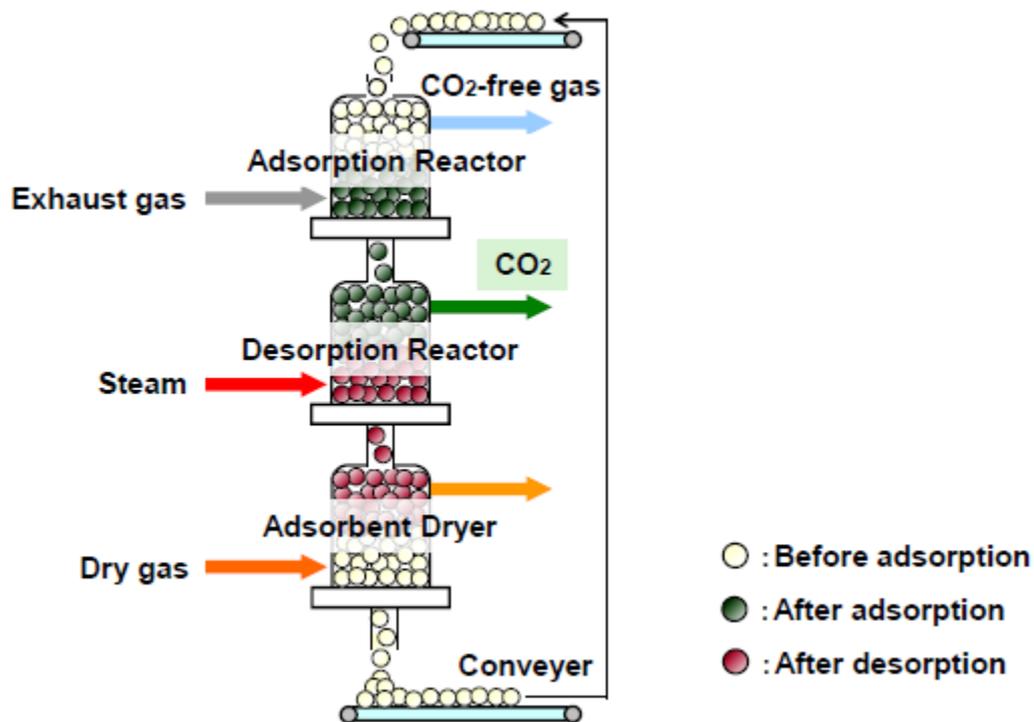
Dónde: central térmica de Lagisza (Polonia), mayor lecho fluidizado en condiciones supercríticas del mundo (460 MWe)



- Adsorbentes: carbón activado y zeolita
- Primeros tests en el mundo *on-site* de la tecnología dual-reflux vacuum-pressure swing adsorption

# Tecnologías de Adsorción – Aplicación Comercial

## KCC (Kawasaki CO<sub>2</sub> Capture) Adsorción en lecho móvil



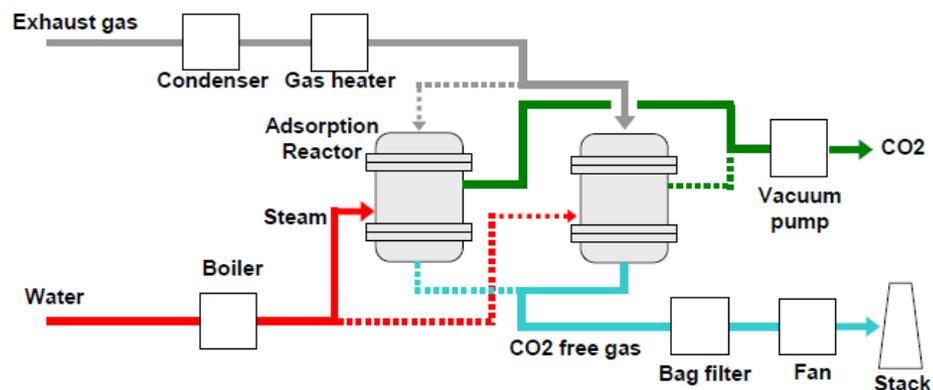
- Captura de CO<sub>2</sub> (3 t/día) mediante adsorbentes impregnados con aminas.
- Desorción con vapor a baja temperatura (60 °C).
- Energía consumida: ~ 3GJ/t CO<sub>2</sub>.

# Tecnologías de Adsorción – Aplicación Comercial

## KCC (Kawasaki CO<sub>2</sub> Capture) Adsorción en lecho fijo



6.5 m (W) × 7.5 m (L) × 12 m (H)

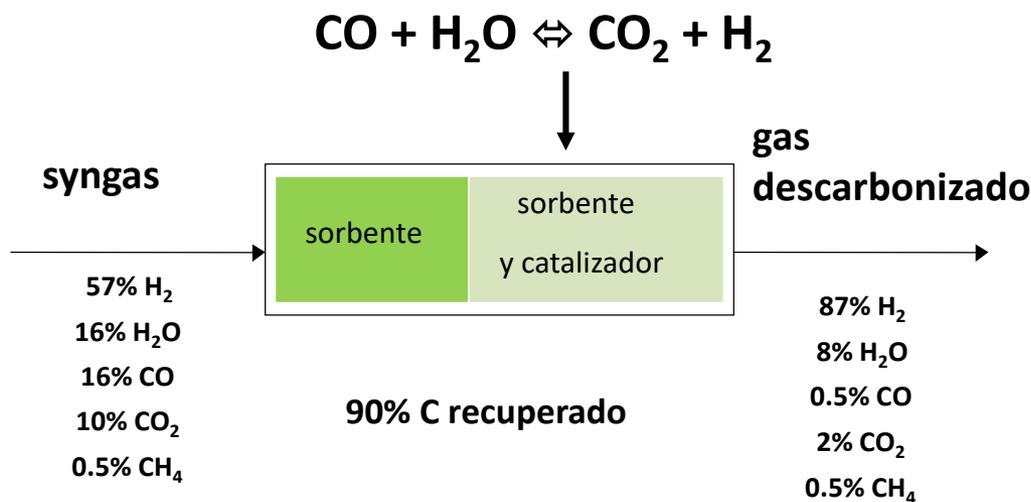


		Case1	Case2	Case3
Flue gas flow rate	Nm <sup>3</sup> /h	960	1700	2000
Concentration of CO <sub>2</sub> in the flue gas	%	12	13	16
Flue gas temperature	°C	40	40	40
Steam temperature	°C	60	60	60

- Captura de CO<sub>2</sub> (10 t/día) mediante adsorbentes impregnados con aminas.
- Desorción con vapor a baja temperatura (60 °C).

# Captura de CO<sub>2</sub> en pre-combustión

*Sorption enhanced water gas shift*



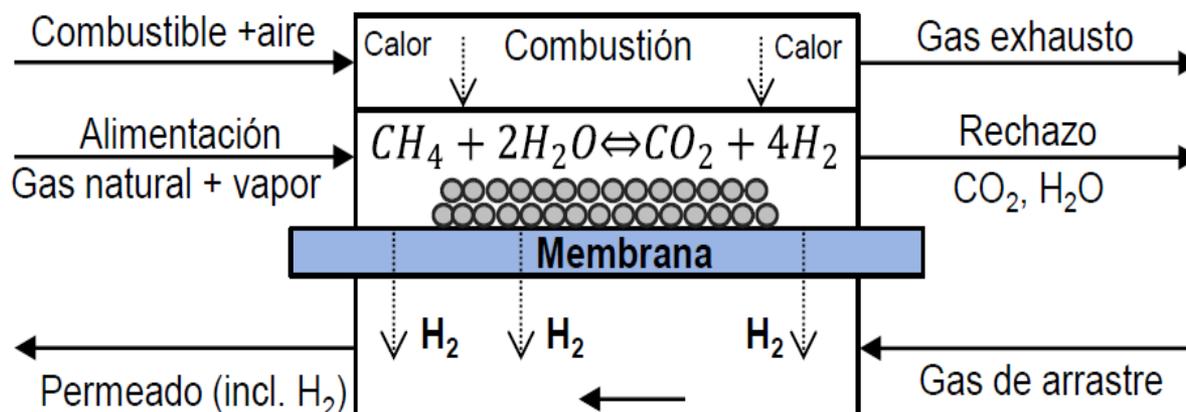
- Catalizador *water gas shift* + **sorbente** CO<sub>2</sub> alta T
- Elimina CO<sub>2</sub> de syngas (400-500°C) y CO ~ 0
- Múltiples lechos trabajando y proceso cíclico: reacción/adsorción – regeneración



# Captura de CO<sub>2</sub> en pre-combustión

## Reactor de membranas SMR-MR

Combinación del reformado de metano, la reacción de WGS y la purificación de H<sub>2</sub> en una sola etapa



Tokyo Gas – Mitsubishi Heavy Industries:

Reactor de lecho fijo con una membrana de aleación de Pd (20 μm). T > 700 °C

Flujo a tratar: 40 Nm<sup>3</sup>/h

Estabilidad: 3000 h

Eficiencia producción de H<sub>2</sub> (99.999% pureza): 85%

Referencia: Voldsund, M. et al. (2016) *Int. J. Hydrogen Energ.*, 41, 4969-4992

# Captura de CO<sub>2</sub> en pre-combustión

## REACTOR SMR o WGS

## REACTOR SMR con ADSORCIÓN

LECHO CON CATALIZADOR +  
MATERIAL ADSORBENTE DE  
CO<sub>2</sub> (hidrotalcitas o silicato de litio)  
Desplazamiento del equilibrio

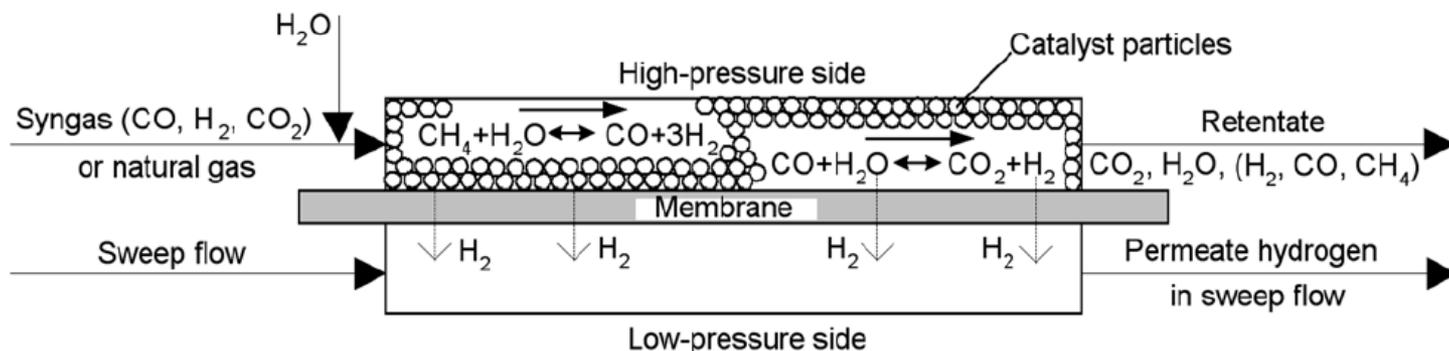
H<sub>2</sub> puro

Regeneración del lecho por  
PSA o TSA → CO<sub>2</sub>

Estado → PLANTA PILOTO

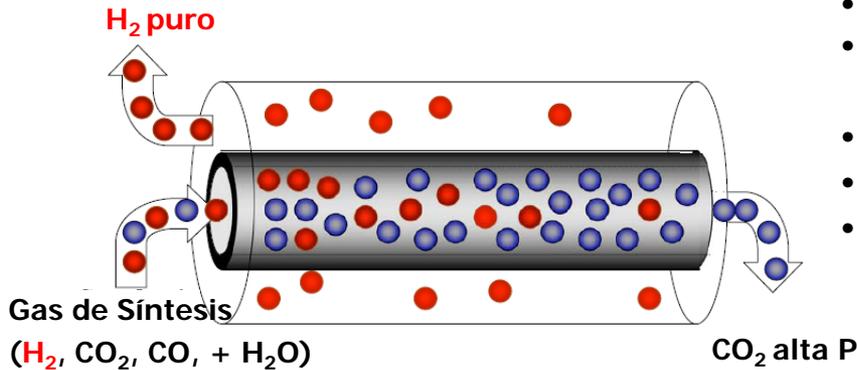
## REACTOR DE MEMBRAN

Separación simultánea del H<sub>2</sub> durante la reacción.  
Aplicable a SMR y WGS

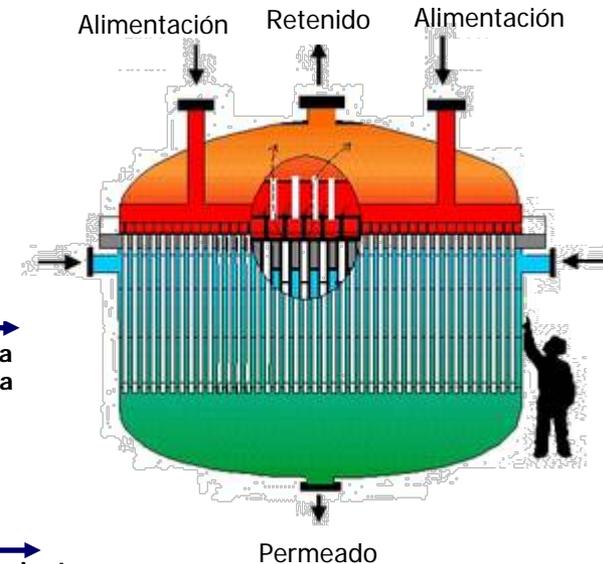
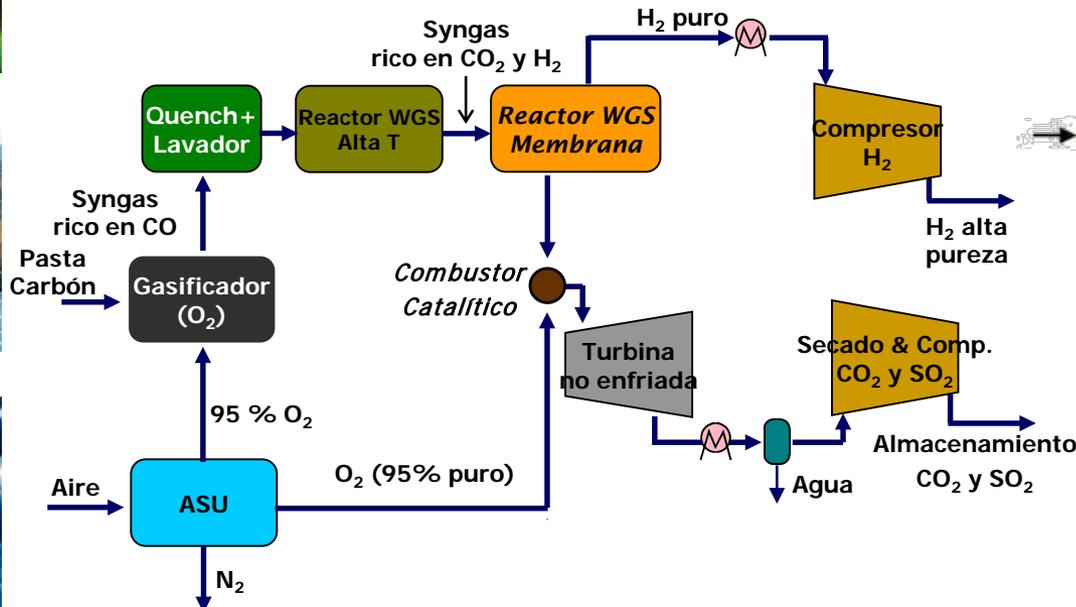


# Captura de CO<sub>2</sub> en pre-combustión

## Reactor WGS de Membrana



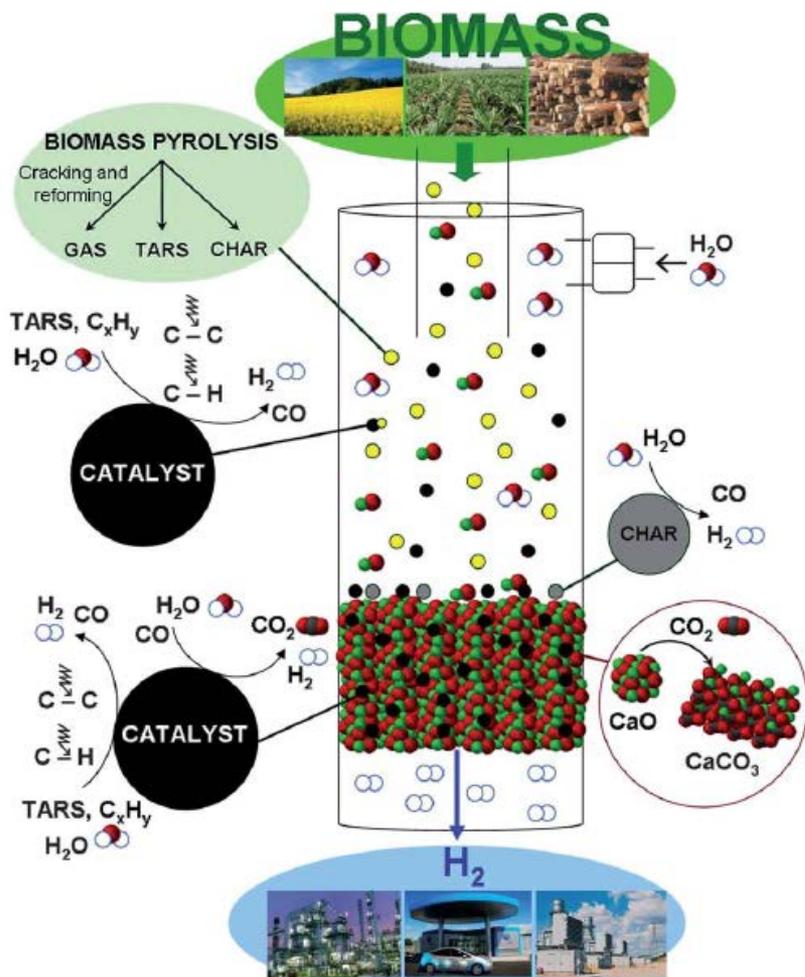
- Alta T para favorecer cinética.
- Membrana permea H<sub>2</sub>: equilibrio se desplaza a la dcha.
- Aplicación procesos gasificación con CAUC.
- Sistema compacto.
- Tecnología no probada a escala comercial.



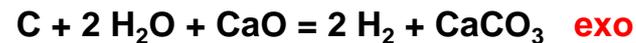
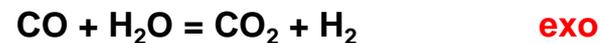
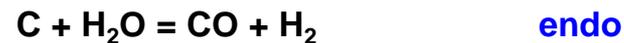
**Reactor de membrana WGS  
100 MW IGCC**

# Captura de CO<sub>2</sub> en pre-combustión

*Sorption enhanced catalytic steam gasification of biomass (SECSGB)*



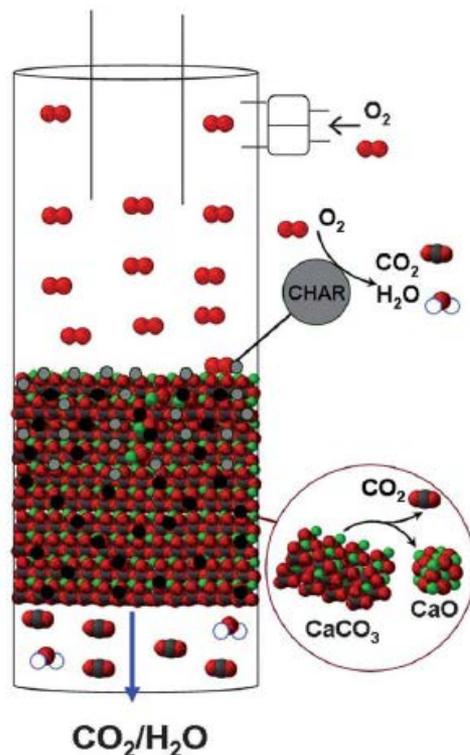
- Biomasa
- CaO
- CO<sub>2</sub>
- H<sub>2</sub>O
- Catalizador
- Char
- H<sub>2</sub>
- O<sub>2</sub>



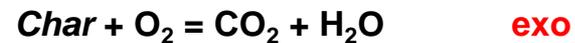
Fuente: Feroso, Rubiera, De Chen, *Energy & Env. Sci.*, 5, 6358 (2012)

# Captura de CO<sub>2</sub> en pre-combustión

*Sorption enhanced catalytic steam gasification of biomass (SECSGB)*



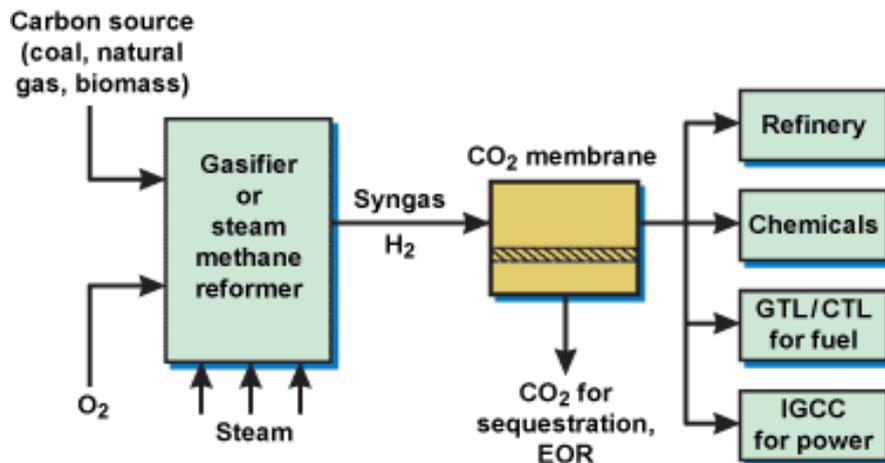
- Biomasa
- CaO
- CO<sub>2</sub>
- H<sub>2</sub>O
- Catalizador
- Char
- H<sub>2</sub>
- O<sub>2</sub>



Fuente: Feroso, Rubiera, De Chen, *Energy & Env. Sci.*, 5, 6358 (2012)

# Captura de CO<sub>2</sub> en pre-combustión

## Steam Methane Reforming



Separación de CO<sub>2</sub> de gas de síntesis con la tecnología de membranas

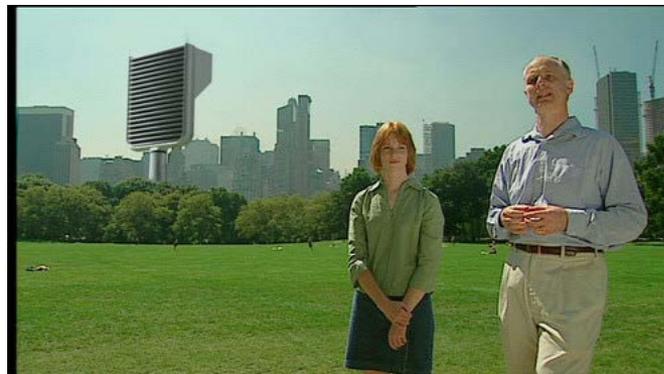
### Tipos de membranas:

Polaris (poliméricas)

### Condiciones de separación:

Presión de alimentación: hasta 50 bar  
Alimentación: 1- 6 Mm<sup>3</sup>/día, 10 -60 vol% CO<sub>2</sub>  
CO<sub>2</sub> recuperado > 50 - 80%  
Pureza del CO<sub>2</sub> : hasta 95 vol%

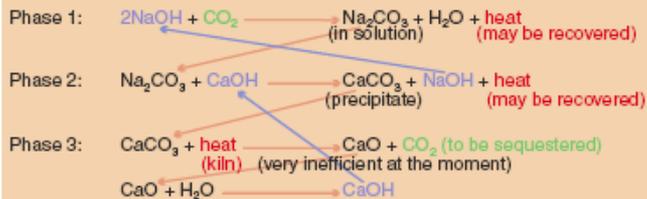
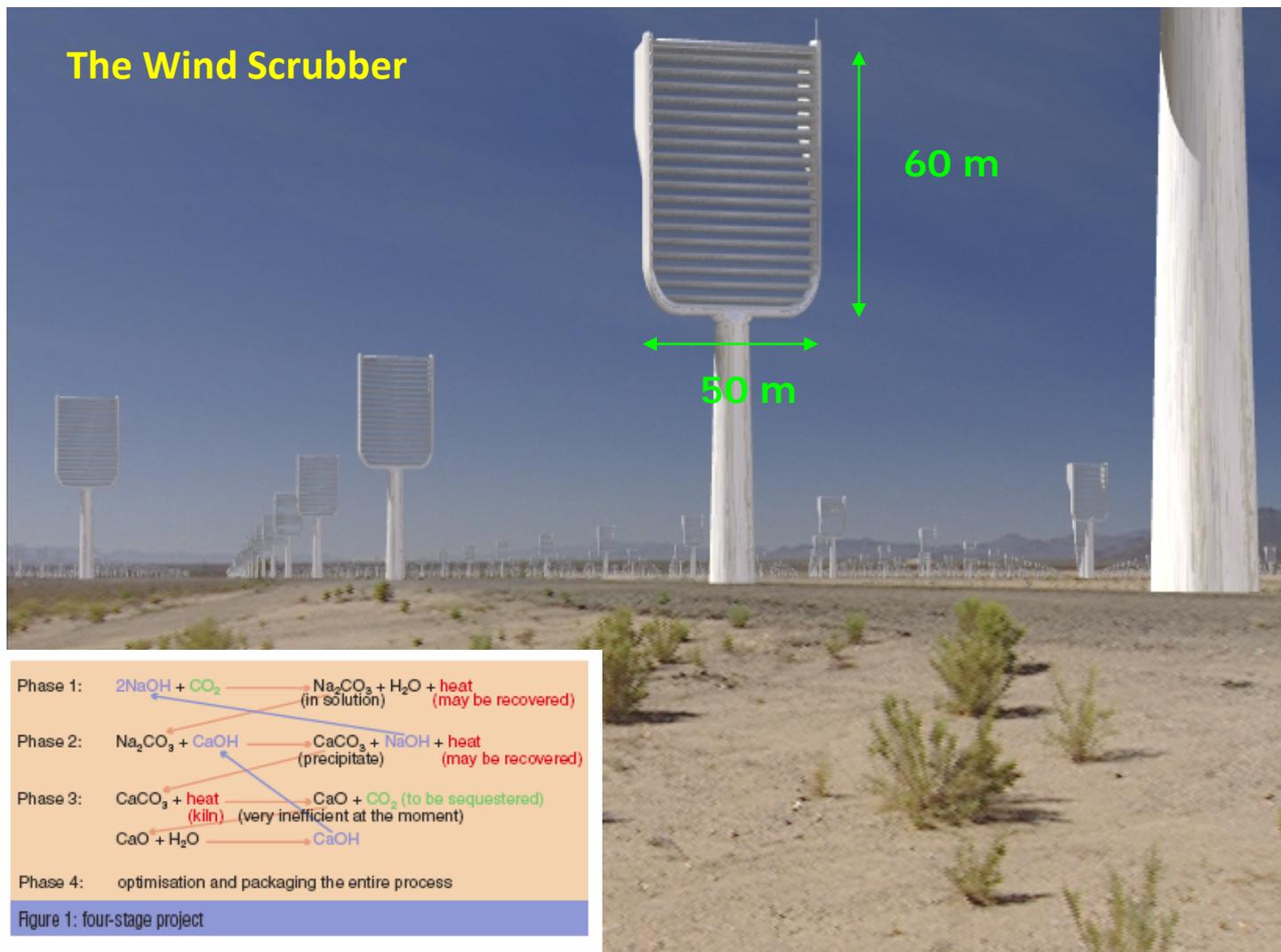
# Captura directa del aire (DAC)



# Captura directa del aire (DAC)



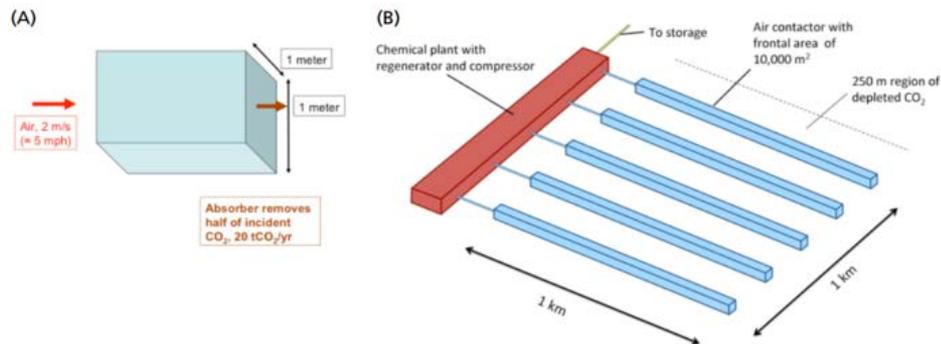
## The Wind Scrubber



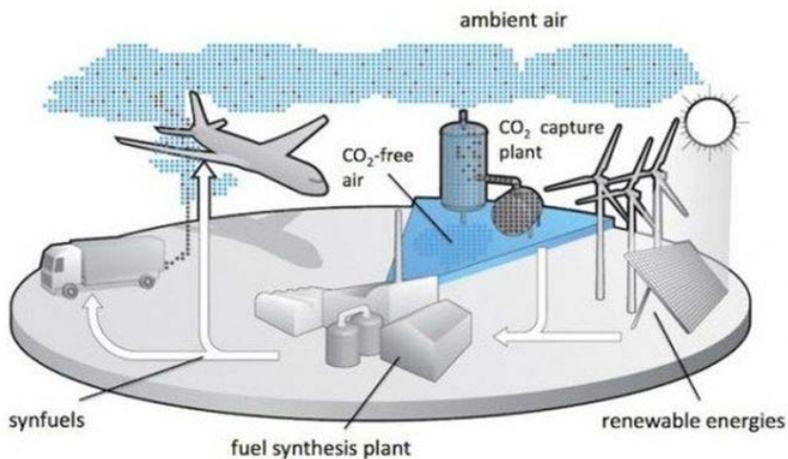
Phase 4: optimisation and packaging the entire process

Figure 1: four-stage project

# Captura directa del aire (DAC)



**Figure 1.2.** Schematic representations of A) a 1 m<sup>2</sup> intake area contactor capturing 20 tCO<sub>2</sub>/yr, and B) a facility for capturing 1 MtCO<sub>2</sub>/yr. The facility in B consists of five structures, each 10 meters high and 1 km long, and could collect 1 MtCO<sub>2</sub>/yr if air passed through at 2 m/s and 50% of the CO<sub>2</sub> were collected. The structures are spaced 250 meters apart, and the footprint of the system is roughly 1.5 km<sup>2</sup>. Approximately six of these systems would be required to compensate for the emissions of a 1 GW coal plant. Buildings not to scale.



# Captura directa del aire (DAC)



## Captura directa del aire (DAC)

- 18 colectores de CO<sub>2</sub> instalados en el techo de una planta de incineración en las afueras de Zurich.
- Utiliza energía residual de la incineradora para operar los colectores que usan ventiladores para aspirar el aire hacia los filtros.
- La desorción del CO<sub>2</sub> se realiza mediante el suministro de calor.
- Uso del CO<sub>2</sub>: a invernadero para cultivo de plantas. Consumo estimado de 900 t CO<sub>2</sub> al año.
- Eliminación del equivalente al 1% emisiones anuales de CO<sub>2</sub> se necesitarían 250 000 plantas DAC.
- El coste sería de unos 400\$/t CO<sub>2</sub>.



***“Es más probable que bajen unos ángeles del cielo y arreglen las emisiones de CO<sub>2</sub> antes de que el mercado lo haga”.***

**William Norhaus. El Mundo, 6 Junio 2018.**



**William Norhaus. Premio Fundación BBVA 2017, Fronteras del Conocimiento en la Categoría del Cambio Climático.**

## Una Reducción de 1 Gt de Carbono por Año (3.7 Gt CO<sub>2</sub>) implicaría:



... Sustitución de CT carbón sin CAUC por centrales nucleares  
500 x 1 GWe (CT 350-800 MWe)



... 700 Centrales Térmicas de Carbón de 1 GWe  
(con captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>)



... 1400 Centrales de Gas en Ciclo Combinado de 1 GWe



... Reemplazar 600 millones de 4 x 4 ó



... 1500 millones de automóviles (130 g CO<sub>2</sub>/km, 20 000 km/año)  
por coches que utilicen H<sub>2</sub> como combustible



... 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> Plantaciones para biocombustibles  
(España 5 10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>, EE.UU. 9.6 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>)

# Reducción de emisiones de GEI

## Consiguen reducir la producción de metano en rumiantes

- El compuesto 3-nitrooxypropanol permite reducir los niveles de este gas de efecto invernadero sin riesgos para el animal
- Rumiantes como vacas, ovejas o cabras producen el 35% de las emisiones de metano a la atmósfera



Fuente: E.C. Duin et al. Mode of action uncovered for the specific reduction of methane emissions from ruminants by the small molecule 3-nitrooxypropanol. Proceedings of the National Academy of Sciences. DOI: 10.1073/pnas.1600298113



# GRACIAS POR SU ATENCIÓN

Para más información:



[facebook.com/pteco2](https://facebook.com/pteco2)



[@pteco2](https://twitter.com/pteco2)



[www.pteco2.es](http://www.pteco2.es)



[info@pteco2.es](mailto:info@pteco2.es)



91 441 89 82