

TECNOLOGÍAS DE CAPTURA DE CO₂

Pablo Gutiérrez-Cerezales¹, Silvia Burgos-Rodríguez¹ y M^a Reyes Vigil-Montaño²
¹ Endesa Generación
² Universidad Europea de Madrid

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7003>

1. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA DE CO₂

El aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera se ha relacionado con el cambio climático y este aumento de concentración ha sido debido al fuerte desarrollo tecnológico e industrial. Hay varias tecnologías que permitirían evitar las emisiones de CO₂ y los gases de efecto invernadero:

1. Captura y almacenamiento de CO₂
2. Valorización del CO₂
3. Uso de combustibles que emitan menos CO₂
4. Uso de energías renovables
5. Uso de energía nuclear
6. Eficiencia energética

La finalidad de las tecnologías de captura de CO₂ es producir un flujo casi puro de CO₂ a alta presión, que pueda ser fácilmente transportado a un emplazamiento para su almacenamiento. Para la obtención de un flujo de CO₂ concentrado existen tres sistemas de captura de CO₂, según el punto del

proceso donde se realiza la separación del CO₂ del resto de los gases de combustión: post-combustión, pre-combustión y oxicomcombustión.

1.1. TECNOLOGÍAS POST-COMBUSTIÓN

1.1.1. Descripción

Consiste en la captura del CO₂ después de la combustión de combustibles fósiles. Normalmente, estos sistemas utilizan un solvente químico para captar la pequeña fracción de CO₂, entre un 3% y un 15% del volumen, presente en los gases de combustión, cuyo componente principal es el nitrógeno procedente del aire. En estas circunstancias el CO₂ presenta una baja presión parcial y es necesario tratar un gran volumen para su separación. El proceso esquemático de la captura post-combustión se describe en la Figura 2.

La alternativa que presenta mayor desarrollo para la captura de CO₂, de entre todas las tecnologías post-combustión, es la de absorción química con aminas. A partir del uso de un disolvente químico se consigue un alto nivel de captura de CO₂ (superior al 90%) debido a la cinética de reacción rápida. Esta técnica ya se está utilizando en otros campos industriales, como en la industria química y petrolífera para la eliminación del sulfuro de hidrógeno y del CO₂ de la corriente de gases, y ha sido probada con éxito, a menores escalas, pudiéndose aplicar a los gases a la salida de la combustión sin afectar a la operación del proceso original ni al *lay-out* de la planta (Club Español de la Energía).

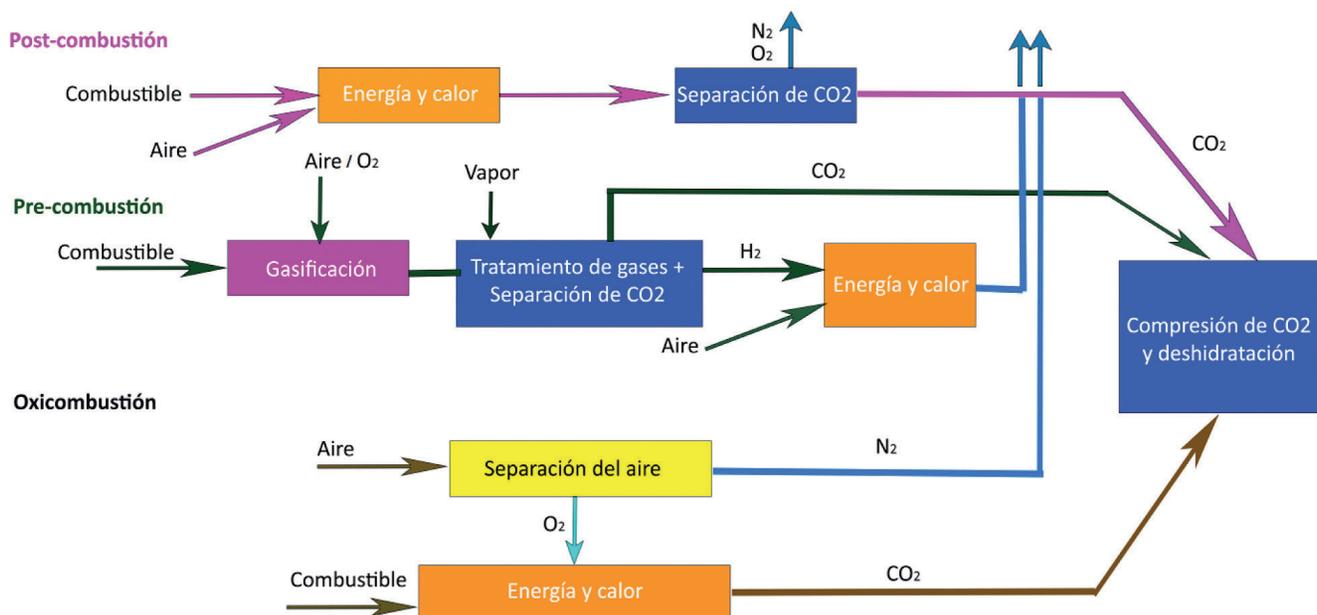


Figura 1: Esquema funcionamiento de las tecnologías CAC (Global CCS Institute)



Figura 2: Captura de CO₂ post-combustión (Vattenfall)

Otras tecnologías para la captura de CO₂ post-combustión son:

- Ciclo de carbonatación/calcinación: Se basa en una combinación de procesos, donde la retención química del CO₂ se lleva a cabo usando su reacción con cal para dar caliza. La carbonatación es una reacción exotérmica, donde los reactivos CO₂ y CaO reaccionan para producir CaCO₃. La calcinación, en cambio, es el proceso inverso, pues produce la desorción del CO₂ y CaO mediante la descomposición de la caliza en presencia de calor.
- Adsorción física: Utiliza materiales capaces de adsorber el CO₂, generalmente a altas temperaturas, para luego recuperarlo mediante procesos de cambio de temperatura (TSA) o presión (PSA) por medio de vapor (Conama 10).
- Membranas: Este proceso se utiliza para la captura de altas concentraciones de CO₂ en gases a alta presión. Dentro de las limitaciones de este sistema destaca el mayor consumo de energía y, por ello, resulta ineficiente frente a la absorción química, así como también incurre en un menor porcentaje de separación de CO₂, indicadores de la falta de desarrollo de esta tecnología y del esfuerzo necesario para encontrar membranas tecnológicamente viables a escala industrial (Muñoz CM, Morales H, Torres C).
- Destilación criogénica: Consiste en una serie de etapas de compresión, enfriamiento y expansión, en las cuales los componentes del gas se pueden separar en una columna de destilación. Esta tecnología se utiliza sobre todo para separar las impurezas de una corriente de CO₂ de alta pureza. No se ha utilizado a la escala y condiciones que se necesitan para los sistemas de captura de CO₂ industriales (Muñoz C.M., Morales H., Torres C.).

1.1.2. Ventajas e inconvenientes

Una de las principales ventajas que presentan las tecnologías post-combustión es su flexibilidad, permitiendo la adaptación de plantas existentes, ya que no requiere estar in-

corporada en el diseño inicial de la planta. Se espera que entre las primeras plantas que se pongan en funcionamiento para la captura a escala de demostración en los próximos años, la tecnología de post-combustión cuente con una cuota elevada de instalaciones, que permitan una importante reducción de costes, ya que muchos procesos son comerciales (absorción química) incluso a escala similar al volumen de gases a tratar (Club Español de la Energía).

La aplicación de la post-combustión en los procesos existentes, principalmente en centrales térmicas de carbón, presenta las siguientes barreras (Club Español de la Energía):

1. Aumento del coste de la energía, especialmente penalizado por el alto consumo energético necesario para la regeneración del absorbente.
2. Mayores demandas de eficiencia en las unidades de desulfuración y des-nitrificación
3. Falta de experiencia de su aplicación en grandes instalaciones industriales a escala de demostración.
4. Mayor volumen de gases a tratar que en la oxicomustión y pre-combustión.

Estas tecnologías también presentan otros riesgos asociados a incertidumbres tecnológicas como las que se exponen a continuación:

5. Corrosión
6. Degradación de las aminas con formación de precipitados sólidos
7. Necesidad de investigación con nuevos absorbentes que aporten mayor eficiencia al sistema de captura.

Siendo los puntos 1 y 3 barreras comunes, en mayor o menor medida, también a las otras tecnologías que veremos a continuación.

1.2. TECNOLOGÍAS PRE-COMBUSTIÓN

1.2.1. Descripción

A pesar de que el proceso inicial de retirar el carbono antes de la combustión es más complejo y caro, las concentraciones más altas de CO₂ y la presión más elevada facilitan la separación. Los procesos de captura de CO₂ previos a la combustión se realizan en los siguientes pasos (Club Español de la Energía):

1. Transformación del combustible primario en una corriente de gas cuyos principales componentes son CO y H₂ (gas de síntesis).
2. Producción de hidrógeno adicional y CO₂ mediante la reacción del monóxido de carbono con el vapor en un segundo reactor (reactor de conversión).
3. Separación del CO₂ del hidrógeno, utilizando los métodos de captura similares a los analizados en post-

combustión, siendo en la actualidad los más empleados la absorción química y la absorción física.

Las tecnologías de captura antes de la combustión pueden ser aplicadas a todos los recursos fósiles, tales como gas natural, fuel y carbón, existiendo varias tecnologías para la obtención del gas de síntesis (Conama 10):

- Reformado de metano con vapor (SMR), es la más utilizada para producir H₂ en países con disponibilidad de gas natural. Como paso previo es necesaria la eliminación del azufre del combustible de alimentación.
- Oxidación parcial (POX), en la que el combustible reacciona con O₂ puro a alta presión para producir el gas de síntesis. Es un proceso exotérmico que se da a alta temperatura, y no requiere aporte de calor externo. Como contrapartida necesita de una Unidad de Separación de Aire que requiere una alta inversión y coste de operación.
- Reformado auto térmico (ATR), es una combinación del reformado y oxidación parcial. El calor necesario para la reacción de reformado (reacción 1) es aportado por la de oxidación parcial (reacción 2) usando oxígeno o aire.
- Gasificación, en la que se obtiene el gas de síntesis a partir del combustible sólido o líquido. Consiste básicamente en la oxidación parcial de los combustibles, pudiéndose utilizar también vapor como agente oxidante en el reactor. Si el objetivo es capturar el CO₂, como oxidante principal preferiblemente se utiliza el O₂. Los gasificadores pueden ser de lechos fijo, fluido o arrastrado y de características diversas.

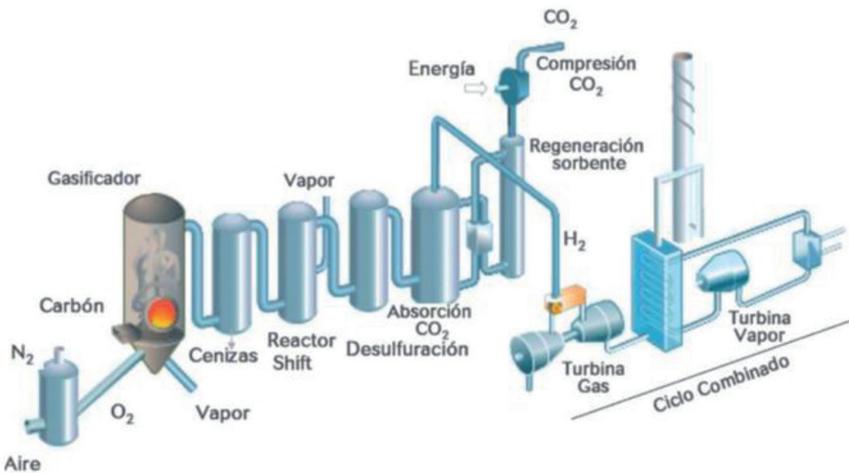


Figura 3: Tecnología de captura de CO₂ pre-combustión para una planta GICC (Vattenfall)

1.2.2. Ventajas e inconvenientes

Las tecnologías de pre-combustión se encuentran en un punto relativamente avanzado de la curva de aprendizaje, re-

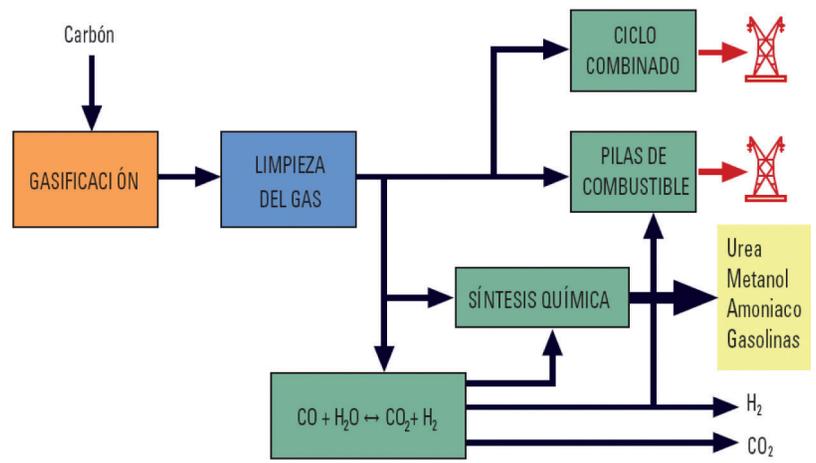


Figura 4: Aplicaciones de la gasificación. (Treviño-Coca M)

duciendo los riesgos tecnológicos, que derivarán en menor incertidumbre sobre la inversión, el rendimiento final, los costes de operación y mantenimiento, etc. Además, presenta una potencial ventaja futura al producir hidrógeno, que podría comercializarse como subproducto de la planta, en un escenario de alta demanda de este combustible. Del mismo modo el producto principal, el gas de síntesis, también puede ser utilizado directamente con fines comerciales. Por tanto, la generación de subproductos susceptibles de comercialización podría actuar como una medida de mitigación de riesgo que permitiría diversificar, parcialmente, los ingresos de la planta, reduciendo la exposición tan directa al mercado eléctrico.

La separación vía solvente físico o químico está probada, los gases de salida salen a mayor presión y mayor concentración de CO₂ que en la captura post-combustión, lo que reduce el coste de captura. Por último, comparativamente con las tecnologías post-combustión, éstas consiguen menor cantidad de impurezas: SO_x, NO_x y cenizas.

Por el contrario, las turbinas de gas, calentadores y calderas deben ser modificadas para la utilización de hidrógeno como combustible. En algunos casos puede requerir calor para regenerar el absorbente y una unidad de separación de aire (ASU) lo que eleva los costos.

1.3. TECNOLOGÍAS DE OXICOMBUSTIÓN

La tecnología de oxicomcombustión se caracteriza por la combustión directa con oxígeno en ausencia de N₂ para concentrar el CO₂ presente en los gases, siendo necesario una Unidad de Separación de Aire (ASU). No obstante, esta corriente no puede utilizarse de forma directa en la combustión, pues las temperaturas de llama estarían muy por encima de las tolerables por los materiales del recinto de caldera. Para evitar este problema se utiliza una corriente de atemperación consistente en gases recirculados de la propia combustión, que se mezcla con el comburente fresco para reducir la temperatura de hogar y facilitar la transferencia de calor. Con este procedimiento se consigue, a la salida de la combustión, una corriente formada casi exclusivamente por

¹ Gasificación Integrada en Ciclo Combinado

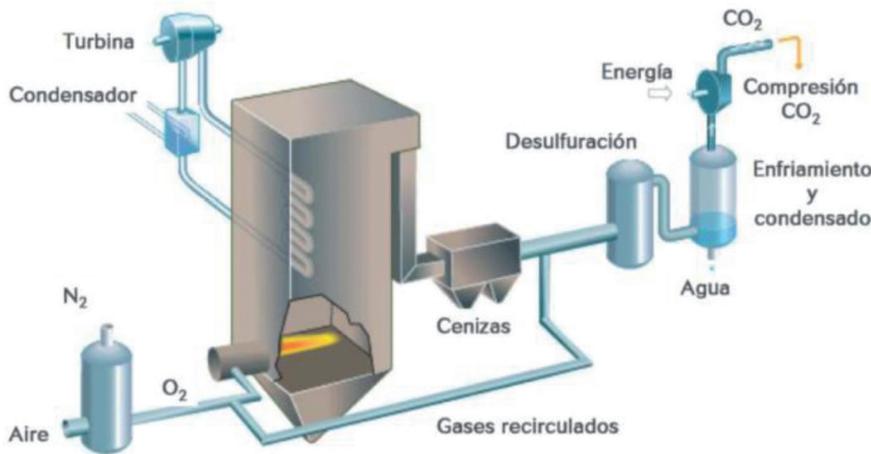


Figura 5: Captura CO₂ mediante oxidación (Vattenfall)

(tras calentamiento), mientras que el O₂ líquido (LOX) se vaporiza (en el cambiador de calor principal), separado en dos corrientes (O₂ primario y secundario), precalentado y enviado a la caldera para ser mezclado con el caudal de gases de combustión recirculado.

1.3.2. Caldera de Lecho Fluido Circulante (LFC)

La caldera de tipo LFC es la que presenta mejores prestaciones para la oxidación, según se ha determinado de las pruebas en plantas de ensayos que se han desarrollado hasta el momento. Cumplirá las siguientes premisas:

- El rango de operación y el tipo de combustible han de ser lo más flexibles posible.
- Se han de minimizar las pérdidas térmicas, maximizando su eficiencia.
- Incluye la desulfuración dentro del hogar de la caldera, mejorando su rendimiento.
- Ha de ser capaz de operar con aire (modo “aire”) como comburente o con una mezcla enriquecida en oxígeno (modo “oxidación”), no debiendo interrumpirse la operación.

Desde el punto de vista de la eficiencia, la caldera LFC dispone de economizadores, calentadores de comburente con vapor y cambiador de calor agua/gases que permite, mediante un circuito cerrado de agua, transvasar calor desde

los gases de escape hacia el comburente. Estos equipos permiten calentar dicho comburente, minimizando así la cantidad

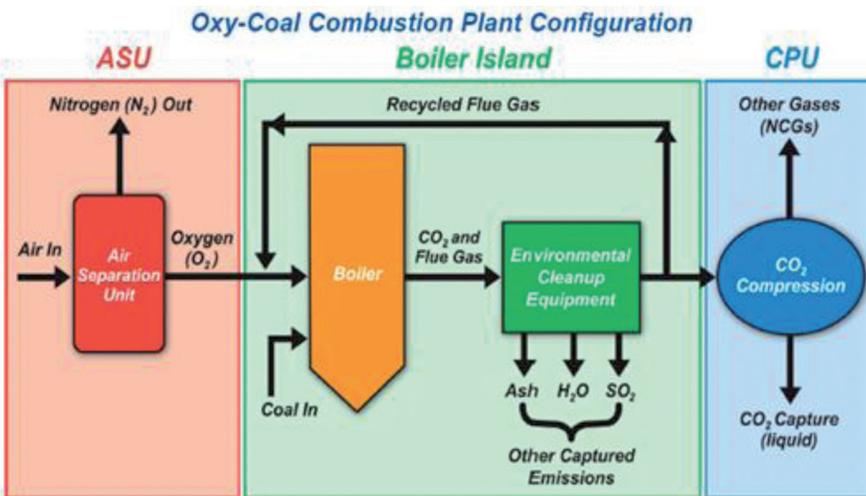


Figura 6: Equipos principales de esta tecnología (FutureGen Industrial Alliance)

CO₂ y H₂O, de la que el H₂O se puede eliminar fácilmente por condensación. En la siguiente figura se muestra el esquema de una planta de oxidación.

Las instalaciones principales de esta tecnología son:

1.3.1. Unidad de Separación de Aire (ASU)

La ASU produce el oxígeno necesario para la combustión en la caldera. El aire, tras un filtrado, una primera compresión y enfriamiento, pasa por una etapa de purificación (mediante lechos de adsorción) en la que se eliminan, principalmente, tanto hidrocarburos como CO₂ y vapor de agua. Posteriormente, tras una segunda compresión, el N₂ y el O₂ se separan por destilación criogénica. El N₂ líquido (LIN) obtenido se ventea a la atmósfera tras ser utilizado para producir frío (auto-refrigeración) y para regeneración de los lechos de purificación

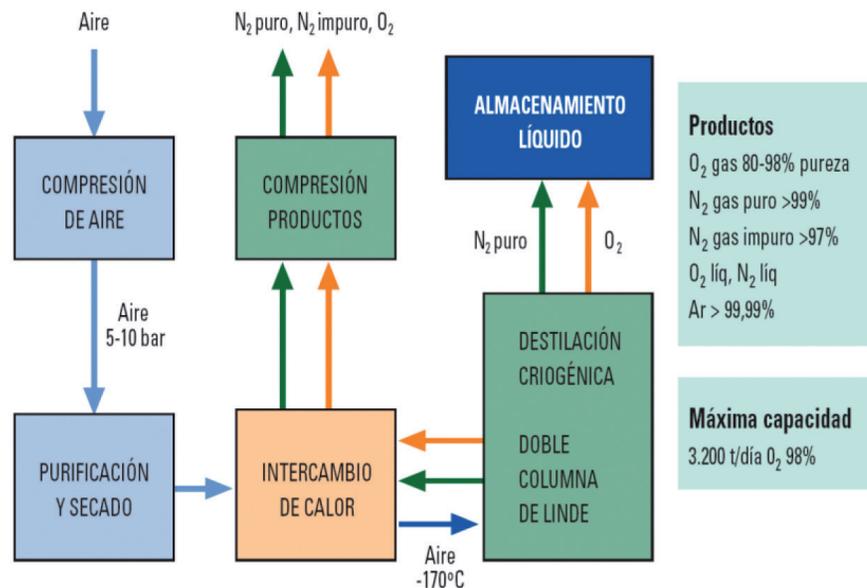


Figura 7: Esquema y productos obtenidos de una ASU (Treviño-Coca M)

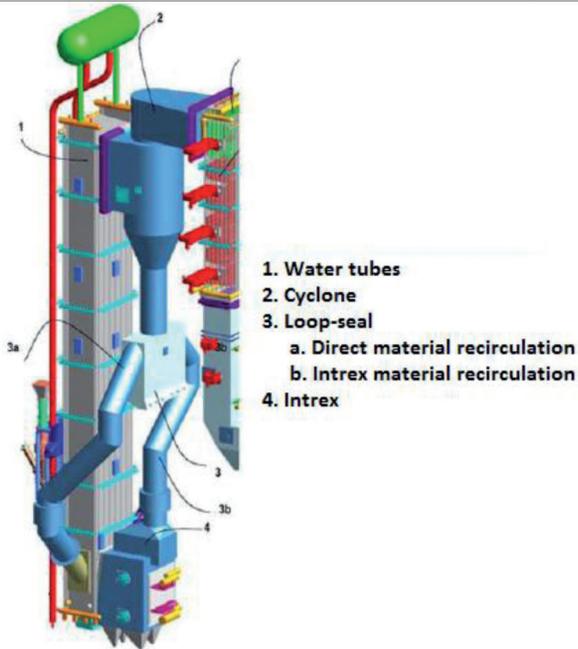


Figura 8: Esquema general de una caldera LFC (ENDESA GENERACIÓN)

de combustible necesario. El fluido a la salida del evaporador está ligeramente sobrecalentado cuando la carga de operación de la caldera está por encima de la mínima carga “once-through”. Por debajo de la mínima carga y durante el arranque y la parada de la caldera, se prevé un sistema de circulación de agua para eliminar las temperaturas diferenciales, a la salida del evaporador, evitando así el estrés térmico.

1.3.3. Purificación y Compresión de CO₂ (CPU)

Por último, la tecnología incorpora una Unidad de Compresión y Purificación (CPU) de CO₂. Durante el funcionamiento en modo oxicomustión, los gases de escape (concentrados en CO₂) no recirculados a caldera, serán enviados a la CPU. El caudal de gases pasa primero por un reactor de lava-

do en el que se elimina parte del SO_x y en el que se condensa la mayor cantidad de vapor de agua. Tras dicho condensador el gas es pre-comprimido y enviado a un segundo reactor químico en el que el NO_x cataliza la eliminación del SO_x remanente. Tras esta etapa, el caudal de gas se envía a unos filtros de mercurio y unos lechos de secado (TSA) y, finalmente, se purifica por destilación criogénica, concentrándose y condensándose el CO₂ en dos niveles de presión. El CO₂ condensado será posteriormente expandido para auto-refrigerar el proceso de destilación criogénica, y dicho CO₂ será finalmente acondicionado a la presión y temperatura para su posterior transporte y almacenamiento. Además, en el proceso se eliminarán las impurezas remanentes (agua, O₂, NO_x, SO_x y partículas) (CIUDEN).

No existen plantas a nivel comercial de estas características por lo que el diseño, construcción y operación a escala real es un factor de incertidumbre que deberá ser tenido en cuenta.

1.3.4. Ventajas e inconvenientes

La oxicomustión, asociada a la separación y compresión del CO₂, es una tecnología de emisiones próxima a cero, que puede aplicarse para un rango muy amplio de combustibles. La masa del gas de escape se reduce aproximadamente en un 75%, lo que implica la reducción de los costos de separación, compresión y almacenamiento (el gas está compuesto principalmente por CO₂ puro, óptimo para el almacenamiento de éste). Se reduce además la pérdida de calor en el escape y el tamaño del equipo de tratamiento de gases de escape. Por último al eliminar el nitrógeno del proceso, se reduce casi por completo la producción de óxidos de nitrógeno (Club Español de la Energía).

Como contrapartida para la aplicación de esta tecnología se encuentra el aumento del coste de la energía, debido fundamentalmente al consumo de instalaciones como la ASU de gran tamaño, por lo que se precisará mayor cantidad de combustible para producir la misma energía neta (Club Español de la Energía).



Figura 9: CPU de proyecto de demostración comercial (ENDESA GENERACIÓN)

	OXICOMBUSTIÓN	POST-COMBUSTIÓN	PRE-COMBUSTIÓN
RANGO DE COMBUSTIBLES	ALTO	MEDIO	BAJO
FLEXIBILIDAD DE ADAPTACIÓN A CENTRALES EXISTENTES	BAJO	ALTO	MEDIO
MADUREZ TECNOLOGÍA	BAJO	MEDIO	MEDIO
COSTES DE CAPTURA	MEDIO	ALTO	MEDIO
SUBPRODUCTOS VALORIZABLES	BAJO	BAJO	MEDIO
COSTES INVERSIÓN	MUY ALTO	ALTO	ALTO
PENALIZACIÓN DEL RENDIMIENTO	ALTO	ALTO	ALTO

Figura 10: Comparativa de tecnologías de captura de CO₂

CONCLUSIONES

Hasta el momento se han desarrollado un elevado número de investigaciones para las diferentes tecnologías de captura, pero todavía no existe consenso acerca de cuál podría ser la tecnología que va a situarse como preferente. La utilización de una tecnología u otra estará en función de la flexibilidad del combustible, la decisión de integrar la planta de captura en una instalación existente o construir una central térmica nueva con captura de CO₂ integrada (*International Energy Agency*). Desde el punto de vista de viabilidad económica, las tres tecnologías evaluadas (post-combustión, pre-combustión y oxi-combustión) se encuentran en una situación similar, los distintos informes aportan cifras con variaciones, pero en cualquier caso muestran que las tres tecnologías requieren un nivel de inversión elevado (*Zero Emissions Platform*).

Existen distintas fuentes que coinciden en que los principales retos, para el desarrollo de la tecnología de captura en el sector eléctrico, son la necesidad de un elevado nivel de capital para la instalación de los equipos de captura y la superación de la penalización energética que supone la pérdida de producción neta de electricidad.

Adicionalmente, es necesario superar problemas de escala, integración de los diferentes componentes y composición de los gases de combustión, junto a otros riesgos tecnológicos. Para ello es necesario promover una mayor eficiencia en los procesos de combustión, realizar mejoras en la integración y en la flexibilidad en las plantas de generación de electricidad, y apostar por el I+D de las diferentes tecnologías de captura de CO₂.

En post-combustión existe un número significativo de proyectos piloto para desarrollar nuevos y mejores solventes para los gases de combustión y para mejorar su balance energético. Un ejemplo de proyecto piloto de aminas es el desarrollado en Compostilla por Endesa, de 300kWt.

Relacionado con la pre-combustión, hay más de 150 plan-

tas de gasificación en operación² de una potencia media de 500MWth, pero muy pocas de éstas cuentan con una instalación de captura de CO₂ por sus altos costes, o centrales eléctricas GICC, que aprovechan el gas de síntesis para producir electricidad a partir de un ciclo combinado (Club Español de la Energía).

En la actualidad todas las instalaciones industriales de oxicombustión con el fin de capturar CO₂ se encuentran en fase de investigación y desarrollo. De entre las principales iniciativas de plantas de desarrollo tecnológico, destaca la española de la Fundación Ciudad de la Energía (CIUDEN) situada en Cubillos del Sil (León), que utiliza dos calderas, una de carbón pulverizado de 20MWt y otra de lecho fluido circulante de 30MWt. Cuenta con varios tipos de quemadores y operará con diferentes tipos de carbón, incluyendo antracita autóctona de la zona del Bierzo (Conama 10).

Los desarrollos a escala industrial pasan por superar las dificultades que se pongan de manifiesto durante el funcionamiento de las plantas piloto y de demostración.

PARA SABER MÁS

- CIUDEN. "Planta de desarrollo tecnológico del Bierzo de la Fundación Ciudad de la Energía: Descripción del proceso CPU". Informe OXC-09-MEM-10-05001. Cubillos del Sil, (España). Junio 2011.3p.
- Club Español de la Energía. "Hacia un modelo energético más seguro, competitivo y sostenible". Grupo de trabajo de políticas energéticas y medioambientales de la Unión Europea. Instituto Español de la Energía, Madrid (España). Mayo 2012. 19p. ISBN: 978-84-615-8945-6.
- Conama 10. "GT-02-Captura y almacenamiento de CO₂". Documento del Grupo de Trabajo de Conama 10, 2012. 156p.
- ENDESA GENERACIÓN. *El Proyecto Compostilla OXYCFB300*. 2012. <http://www.compostillaproject.eu/>.
- FutureGen Industrial Alliance. *FutureGen 2.0 Project Oxy-combustion*. 2013. <http://www.futuregenalliance.org/futuregen-2-0-project/oxy-combustion/>.
- Global CCS Institute. "The Global Status of CCS: 2012". Canberra, Australia. 2012. 218p. ISBN 978-0-9871863-1-7.
- International Energy Agency. "Technology Roadmap: Carbon capture and storage edition". OECD/IEA, Paris, France. 2013. 60p. <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/name,39359,en.html>.
- Muñoz C.M., Morales H., Torres C. "Tecnologías de captura y secuestro de CO₂". Escuela de Ingeniería Eléctrica, Pontificia Universidad Católica de Chile. Mayo 2008. 52p.
- Treviño-Coca M. "Tecnología de gasificación integrada en ciclo combinado: GICC". Aplicación real en España: ELCOGAS. Puertollano. Club Español de la Energía, ELCOGAS, 2003. 95p. M-26805-2003.
- Vattenfall. *Technology Vattenfall/ Capture of CO₂*, December 2012. <http://www.vattenfall.com/en/ccs/capture-of-co2.htm>.

² La mayoría no incluyen captura de CO₂, estando establecida ésta para los sistemas de gasificación que llevan a la fabricación de combustibles químicos y syngas.

LOCTITE[®]

Todo resultado perfecto
empieza con
la herramienta perfecta



Tú haces que funcione. Con LOCTITE.
El experto en adhesión, sellado, limpieza, lubricación,
protección y reconstrucción de superficies.

Descúbrelo todo en: www.loctite-maintenance.es



Excellence is our Passion