



ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar

ISSN: 0138-6204

revista@icidca.edu.cu

Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar
Cuba

Núñez-Caraballo, Arianna; González-Martínez, Martha; Saura-Larí, Gustavo
Proceso de recuperación de CO₂. Generalidades
ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, vol. 49, núm. 2, mayo-agosto, 2015,
pp. 24-32
Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar
Ciudad de La Habana, Cuba

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223143421004>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Proceso de recuperación de CO₂. Generalidades

Arianna Núñez-Caraballo, Martha González-Martínez, Gustavo Saura-Laria

1. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar.
Vía Blanca 804 y Carretera Central, San Miguel del Padrón. La Habana, Cuba.
arianna.nunez@icidca.azcuba.cu

RESUMEN

En el presente trabajo se muestra una recopilación sobre las propiedades físicas y químicas del CO₂, la influencia del mismo en el efecto invernadero, sus aplicaciones en la industria, los sistemas de captura del gas y algunas estrategias que actualmente se siguen para la reducción de las emisiones.

PALABRAS CLAVE: dióxido de carbono, efecto invernadero, absorción.

ABSTRACT

In the present paper is shown a compilation on physical and chemical properties of CO₂, its influence on greenhouse effect, its applications in industry, the systems of gas capture and some strategies that are followed for emission reductions.

KEYWORDS: carbon dioxide, greenhouse effect, absorption

INTRODUCCIÓN

Como consecuencia de la actividad humana, la cantidad de dióxido de carbono (CO₂) liberada a la atmósfera ha aumentado considerablemente durante los últimos 150 años. Su concentración en la atmósfera, principalmente debido a la actividad humana durante y después de la revolución industrial iniciada en 1850, ha aumentado de alrededor de 280 ppm en ese propio año, hasta a 396 ppm en el año 2013, teniendo como resultado el exceso de la cantidad absorbida por la biomasa, los océanos y otros sumideros. Durante décadas no se tuvo ninguna preocupación por la contaminación producida por las emisiones gaseosas vertidas a la atmósfera, tampoco se hicieron estudios que permitieran predecir el impacto que tendría sobre el clima general de la Tierra la emisión de gases tipo invernadero. Hasta los años 2000-2002 incluso los gobiernos más desarrollados y mayormente responsables de tal contaminación negaban sus efectos, en particular el llamado calentamiento global. Sólo la aparición de grandes catástrofes como "los tsunamis", "el huracán Katrina" y el deshielo de

los glaciales han logrado llamar la atención de estas administraciones (1).

Origen del dióxido de carbono

El dióxido de carbono fue uno de los primeros gases descrito como una sustancia distinta del aire. En el siglo XVII, el químico flamenco Jan Baptist van Helmont observó que cuando se quemaba carbón en un recipiente cerrado, la masa resultante de la ceniza era mucho menor que la del carbón original. Su interpretación fue que el carbón fue transformado en una sustancia invisible que él llamó un "gas" (2). Las propiedades del dióxido de carbono fueron estudiadas más a fondo en la década de 1750 por el médico escocés Joseph Black, quien encontró que la piedra caliza (carbonato de calcio) al calentarse o tratarse con ácidos producía un gas que llamó "aire fijo". Observó que el aire fijo era más denso que el aire y que no sustentaba ni las llamas ni a la vida animal (3). Black también encontró que al burbujear a través de una solución acuosa de cal (hidróxido de calcio), se precipitaba carbonato de calcio. Posteriormente se utilizó este fenómeno para ilustrar que el dióxido

de carbono se produce por la respiración animal y la fermentación microbiana. El dióxido de carbono se licuó primero (a presiones elevadas) en 1823 por Humphrey Davy y Michael Faraday (2). La primera descripción de dióxido de carbono sólido fue dada por Charles Thilorier, quien en 1834 abrió un recipiente a presión de dióxido de carbono líquido, sólo para descubrir que el enfriamiento producido por la evaporación rápida del líquido produjo "nieve" de dióxido de carbono sólido (nieve carbónica)(3).

Propiedades químicas y físicas

El dióxido de carbono es una molécula lineal y no polar, a pesar de tener enlaces polares. Esto se debe a que, dada la hibridación del carbono, la molécula posee una geometría lineal y simétrica. Su representación por estructura de Lewis es: $O=C=O$. A pesar de que el dióxido de carbono existe principalmente en su forma gaseosa, también tiene forma sólida y líquida. Solo puede ser sólido a temperaturas de -78°C (4). El dióxido de carbono líquido existe principalmente cuando el dióxido de carbono se disuelve en agua, y solamente es soluble en agua cuando la presión se mantiene. Cuando la presión desciende intentará escapar al aire, dejando una masa de burbujas de aire en el agua (22).

El dióxido de carbono es un gas que se encuentra en muy baja concentración atmosférica de manera natural (5). Es un ingrediente necesario en el ciclo de vida de animales y plantas, se libera en la respiración de los seres vivos y es retenido por las plantas en forma de carbono a través de la fotosíntesis.

Influencia del CO_2 en el efecto invernadero

El calentamiento global de la Tierra como consecuencia del aumento de la concentración del dióxido de carbono y de otros gases con efecto inver-

nadero en la atmósfera es posiblemente la cuestión ambiental más importante que afronta el mundo actualmente. Nuestro planeta produce un efecto natural de retención del calor como ocurre en un invernadero, gracias a algunos gases atmosféricos. Se le llama efecto invernadero por la similitud de efectos térmicos, porque en realidad la acción física por la que se produce es muy distinta a la que ocurre en un invernadero de plantas. Este efecto hace que la temperatura media de la superficie de la Tierra sea 33°C , mayor que la que tendría si no existieran estos gases en la atmósfera (6). Dicho efecto se origina porque la energía que llega del Sol, al proceder de un cuerpo de muy elevada temperatura, está formado por ondas de frecuencias altas que traspasan la atmósfera con gran facilidad. La energía remitida hacia el exterior, desde la Tierra, al proceder de un cuerpo mucho más frío, está en forma de ondas de frecuencias más bajas, "absorbible" por los gases con efecto invernadero (6). Esta retención de la energía hace que la temperatura sea más alta en la superficie de nuestro planeta. En condiciones normales, la cantidad de energía que llega a la Tierra es la misma que la que continuamente se refleja de esta.

Lo que el efecto invernadero consigue es ralentizar la emisión de la energía que llega a la Tierra, y reducir los bruscos cambios de temperatura de la superficie terrestre entre el día y la noche, haciendo posible la vida en nuestro planeta (7). El desequilibrio se produce al aumentar de forma desmedida la concentración de estos gases en la atmósfera. La concentración media de CO_2 se ha incrementado desde unas 275 ppm antes de la revolución industrial, a 315 ppm cuando se empezaron a usar las primeras estaciones de medida exactas en 1958, llegando hasta 396 ppm en 2013 como se observa en la figura 1 (19).

A partir de 1979, los científicos comenzaron a afirmar que un aumento al doble en la concentración del CO_2 en la atmósfera supondría un calen-

Tabla 1. Propiedades físicas del dióxido de carbono (5).

Propiedad	Valor
Masa molecular	44,01
Gravedad específica	1,53 a 21°C
Densidad crítica	468 kg/m^3
Concentración en el aire (año 2013)	396 ppm
Estabilidad	Alta
Líquido	Presión $< 415,8 \cdot 10^3\text{Pa}$
Sólido	Temperatura $< -78^{\circ}\text{C}$
Constante de solubilidad de Henry	$298,15\text{ mol/kg} \cdot \text{bar}$
Solubilidad en agua	$0,9\text{ vol/vol}$ a 20°C

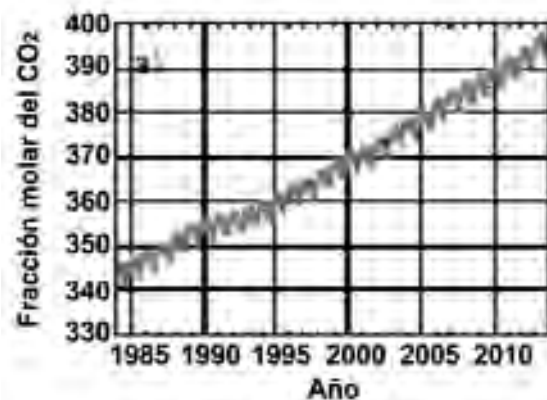


Figura 1: Promedio mundial de la fracción molar del CO_2 .

tamiento medio de la superficie de la Tierra de entre 1,5 y 4,5 °C, si bien estudios más recientes sugieren que el calentamiento se produciría más rápidamente sobre tierra firme que sobre los mares (7).

Existen en la atmósfera otros gases con efecto invernadero más activos que el CO₂, tales como el metano, con una acción 25 veces superior al CO₂, el cual alcanzó un nuevo máximo en 2013, en torno a 1824 ppm, debido al incremento de las emisiones procedentes de fuentes antropogénicas, y el óxido nitroso cuya concentración atmosférica fue de unas 325,9 ppm en 2013 (19). No obstante, como la cantidad de CO₂ es mucho mayor que la del resto de los gases, su contribución real al efecto invernadero es del 76 % respecto al total de gases. Otros como el oxígeno (20,9 %) y el nitrógeno (78,1 %), aunque se encuentran en proporciones muchos mayores, no son capaces de generar efecto invernadero (8). La atmósfera contiene vapor de agua (1 %) que es un gas radioactivo, de los 30 grados de incremento de temperatura media que se le atribuye al efecto invernadero en nuestro planeta, menos de medio grado se deben al CO₂, además de otros gases, mientras que el vapor de agua es el protagonista principal, con más de 29 grados (20), este no es un gas de procedencia antropogénica y varía según mecanismos naturales.

La agricultura desarrollada es una alta consumidora de energía (básicamente de fuentes fósiles) para la producción de fertilizantes, agroquímicos y la operación de toda la maquinaria que se emplea en las labores agrícolas. A pesar de estos gastos energéticos, el sector agrícola, consume solo el 25 % de la energía para llevar el alimento a nuestras mesas, el resto se gasta durante la cadena de procesamiento, empaque, congelación, cocción y transportación (21). Los fertilizantes se encuentran dentro de los consumidores más importantes de energía fósil en la agricultura industrializada. Esta es la fuente simple mayor de gases de efecto invernadero de la agricultura, seguido por la ganadería (emisión de metano por la digestión anaeróbica de los rumiantes) y el cultivo del arroz (anegación de tierras, emisión de metano). Por otra parte, las grandes cantidades de nitrógeno que atraen las plantaciones o que se depositan artificialmente en el suelo, son posteriormente emitidas a la atmósfera, en alguna medida, como óxido nitroso (unas 298 veces mayor que el efecto invernadero del CO₂). El transporte global contribuye también en el 14 % a la emisión de gases de efecto invernadero (21).

En la Cumbre Mundial del Clima de Kioto en diciembre de 1997, se reconoció oficialmente la gravedad del problema por parte de todos los países industrializados, pero las reducciones acorda-

das de emisiones de gases invernadero (especialmente CO₂) fueron relativamente escasas (8), una consideración científica indicó que para obtener una corrección real del efecto invernadero en la Tierra se debería reducir como mínimo, un 46 % en los países industrializados para el 2010. La tabla 2 muestra la lista de países más contaminantes en la actualidad.

Tabla 2. Emisiones totales de gases de efecto invernadero en los países industrializados y semiindustrializados más contaminadores

País	Emisiones totales, millones ton/año	Año de referencia
China	9 900	2012
EE.UU.	5 200	2012
UE	3 700	2012
India	1 970	2012
Rusia	1 770	2012
Japón	1 320	2012
Alemania	810	2012
Corea del Sur	640	2012
Canadá	560	2012
Reino Unido	490	2012

Si bien es cierto que la mayor responsabilidad de este problema lo deben asumir los países más desarrollados, principales responsables de la situación ambiental actual, los países latinoamericanos no pueden quedarse al margen. América Latina, la región con menos emisión de CO₂ en el mundo, puede jugar un papel importante contribuyendo con alternativas de sustitución de ciertas fuentes de energía menos costosas desde el punto de vista ambiental. En la tabla 3 se muestran las emisiones de CO₂ en algunos sectores de países que pertenecen al Mercosur (9). Diversas organizaciones internacionales como Convención de Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio de Clima (UNFCCC) y el Panel Intergubernamental sobre el Cambio de Clima (IPCC) han sido formadas para dirigir el tema de la reducción del efecto invernadero.

El dióxido de carbono juega un papel importante en los procesos vitales de plantas y animales, tales como fotosíntesis y respiración. Las plantas verdes transforman el dióxido de carbono y el agua en compuestos alimentarios, tales como glucosa y oxígeno. Este proceso se denomina fotosíntesis. Las plantas y los animales, a su vez, transforman los componentes alimentarios combinán-

Tabla 3. Emisiones de CO₂ por sector en los países del Mercosur (9)

País	Emisión por combustibles fósiles	Electricidad	Auto - productores	Otras industrias	Manufactureras y de construcción	Transporte
Argentina	3591	572	132	379	603	1188
Bolivia	991	153	11	115	138	449
Brasil	1708	70	49	155	509	758
Chile	3502	940	60	229	990	1028
Paraguay	766		4		24	664
Uruguay	1687	82	9	67	351	809
Total	12212	1817	265	905	2615	4896

Fuente: Impactos ambientales del sector energético en el Mercosur. Noviembre 2001

dolos con oxígeno para obtener energía para el crecimiento y otras funciones vitales. Este es el proceso de respiración, el inverso de la fotosíntesis. La fotosíntesis domina durante la época más templada del año y la respiración domina durante la época más fría del año. Sin embargo, ambos procesos tienen lugar a lo largo de todo el año. En conjunto, entonces, el dióxido de carbono en la atmósfera disminuye durante la época de crecimiento y aumenta durante el resto del año.

Debido a que las estaciones en los hemisferios norte y sur son opuestas, el dióxido de carbono en la atmósfera aumenta en el norte mientras que disminuye en el sur y viceversa. El ciclo está más claramente presente en el hemisferio norte porque tiene relativamente más masa y vegetación terrestre. Los océanos predominan en el hemisferio sur (10).

Una de las aplicaciones más importantes cerca del punto de producción es la mejor recuperación de petróleo (MRP) que permite aumentar la producción de petróleo crudo; en este caso, CO₂ es inyectado en un depósito de petróleo que sufre de baja productividad, aplicación desarrollada en Estados Unidos. El resto de CO₂ se utiliza en forma líquida o sólida (11).

Aplicaciones del CO₂ recuperado

En la actualidad, el CO₂ es un subproducto de muchos procesos industriales: producción de amoníaco sintético, de hidrógeno, fermentación y síntesis de ciertos productos químicos con presencia de monóxido de carbono. Sus aplicaciones son muchas y muy variadas, y se pueden diferenciar según el estado en que se encuentra el gas, como se detalla a continuación:

CO₂ gaseoso

Una gran proporción (aprox. 50 %) de todo el CO₂ recuperado se utiliza en el punto de producción de productos químicos comerciales, principal-

mente urea y metanol. En estas aplicaciones el CO₂ se utiliza en estado gaseoso, y sus propiedades químicas son de vital importancia. Igualmente, se utiliza en mataderos para el aturdimiento de animales (10).

CO₂ líquido

Los usos del CO₂ en estado líquido son los más variados. Previamente a la licuefacción del CO₂, este se ha de purificar. Se utiliza carbón activo para eliminar olores y sabores. También es importante el secado del gas, mediante alúmina activada o gel de sílice. La temperatura crítica es de 31 °C y la presión crítica 7,4 MPa, por lo que debe ser licuado a cualquier temperatura entre 31 °C y su punto triple (-56,6 °C).

Se utiliza como disolvente en el descafeinado de café para reducir la nicotina del tabaco; para el limpiar corcho y evitar el sabor a este que a veces se detecta en el vino embotellado; en la extracción y fraccionamiento del lúpulo que se utiliza para la elaboración de la cerveza; para la eliminación de plaguicidas y productos no deseados en cereales; para la extracción de productos oleaginosos de los sustratos que los contienen (aceites de semillas, oleorresina de pimentón, aceites esenciales de plantas, manteca de cacao, etc.); para producir lecitina en polvo; para la microencapsulación de aceites esenciales; para la formulación de ácidos grasos omega-3 y varios productos farmacéuticos; para la inactivación de microorganismos; para la limpieza en seco; para la impregnación de madera con fungicidas orgánicos; para el teñido de fibras; como medio de reacción en la hidrogenación de aceites; en la síntesis de nuevos materiales; en el procesamiento de plásticos en equipos electrónicos (6).

Una aplicación extendida del CO₂ es la obtención de atmósferas inertes. En el manejo y transporte de alimentos envasados, la pérdida de aroma o el crecimiento de bacterias se puede prevenir

mediante el uso de CO_2 : en embotellado y transporte de cerveza, empaquetado de café, transporte de frutas, vegetales y cereales, claros ejemplos donde, además, la naturaleza no tóxica del CO_2 es obviamente muy importante, compitiendo con el nitrógeno en esta aplicación.

El CO_2 es muy útil en la extinción de incendios porque es más pesado que el aire y extremadamente estable. Puede ser utilizado en aquellos fuegos en los que el agua no sea eficaz, por ejemplo en los de origen eléctrico. Dado que no es tóxico y se evapora sin dejar residuo, no daña ni contamina los materiales sobre los que actúa.

También se utiliza como gas de protección de soldaduras, cuya función es proteger la zona a soldar del ataque del oxígeno, nitrógeno e hidrógeno. Pocos gases poseen este efecto escudo, y las alternativas al CO_2 (gases nobles, principalmente Ar) son más caras.

Una aplicación derivada de su acción en la naturaleza es la mejora del crecimiento de las plantas, seguida sobre todo en el Reino Unido y Holanda por los agricultores de frutas y verduras. Introducen el gas en sus invernaderos para aumentar los niveles que normalmente se encuentran en el aire (la concentración normal de 100 mg/kg puede elevarse hasta tres veces). Las plantas responden asimilando una mayor cantidad de CO_2 con aumentos del rendimiento de hasta un 15 % (10).

El CO_2 se utiliza también en ciertos reactores nucleares como medio de transferencia de calor intermedio, y como refrigerante del reactor, mientras genera vapor para producir electricidad. Es útil en este tipo de aplicaciones porque no se vuelve significativamente radioactivo y se puede disponer en grandes cantidades.

El CO_2 presenta una moderada solubilidad en agua, y se hace uso de esta propiedad en la producción de bebidas alcohólicas y no alcohólicas. Ésta fue la primera gran aplicación del CO_2 . La carbonatación de bebidas se lleva a cabo con CO_2 , para evitar la precipitación de compuestos de calcio insolubles (6).

El uso del CO_2 en la industria del aerosol va aumentando estacionariamente. Esta aplicación depende de la solubilidad en el producto a ser administrado.

En el proceso silicato-dióxido de carbono para la producción de moldes fundidos, se utiliza la reacción química entre el CO_2 y la sílice para unir los granos de arena. El silicato de sodio, uno de los intermedios en la producción de la aspirina, se obtiene de la reacción entre el CO_2 y el fenolato sódico.

También se utiliza en la fabricación de carbonato de plomo básico, y en carbonatos de sodio, potasio y amonio. Y como agente neutralizante en

operaciones de mercerización en la industria textil, con mejor resultado que el ácido sulfúrico.

Por último, el CO_2 líquido se utiliza en la obtención de carbón, siendo alimentado a la mina para que la rápida expansión rompa el carbón. En la extracción a altas presiones de productos naturales se utiliza CO_2 líquido como disolvente, para aislar aromas o fragancias particulares.

CO_2 sólido

El rango de refrigeración del CO_2 sólido se extiende hasta -78°C a presión atmosférica (se pueden conseguir temperaturas menores a presiones reducidas). Se utiliza en forma sólida (hielo seco) para refrigeración, congelación y transporte refrigerado con la ventaja de que cuando sube su temperatura sublima, es decir pasa directamente de sólido a gas, no a líquido como sucede con el hielo convencional (agua congelada), por lo que no "moja" los productos que refrigera, no es pesado y puede ponerse en contacto directo con los alimentos. Se usa para crear niebla artificial, en efectos especiales en el cine, bebidas, espectáculos (12).

Después de la Segunda Guerra Mundial, los cambios en el diseño de los compresores y la posibilidad de disponer de temperaturas muy bajas hizo posible obtener CO_2 en estado líquido a gran escala, y este comenzó a sustituir al sólido en muchas aplicaciones (12).

Los usos en los que aún esté favorecido en estado sólido son muy pocos, donde el peso es un factor importante, como en el transporte de alimentos refrigerados por carretera o aire.

Sistema de captura del CO_2

Existen varias opciones técnicas y económicamente viables para la captura y separación de CO_2 . Otras están en vías de desarrollo tecnológico y se pueden considerar como tecnologías avanzadas de posible aplicación en el futuro. A continuación se describen los diferentes sistemas de captura de CO_2 conocidos. Los utilizados para la captura de CO_2 son los siguientes:

1. Absorción química en líquidos.
2. Métodos criogénicos.
3. Adsorción física en sólidos.
4. Absorción física en líquidos.
5. Separación mediante membranas selectivas.

Algunos de estos diferentes sistemas se han utilizado en la industria química y en la producción de gases para su posterior uso en industrias y en laboratorios. Algunas veces, se combinan dos o más de estos métodos para alcanzar un alto grado de separación del gas interesado de la mezcla (6).

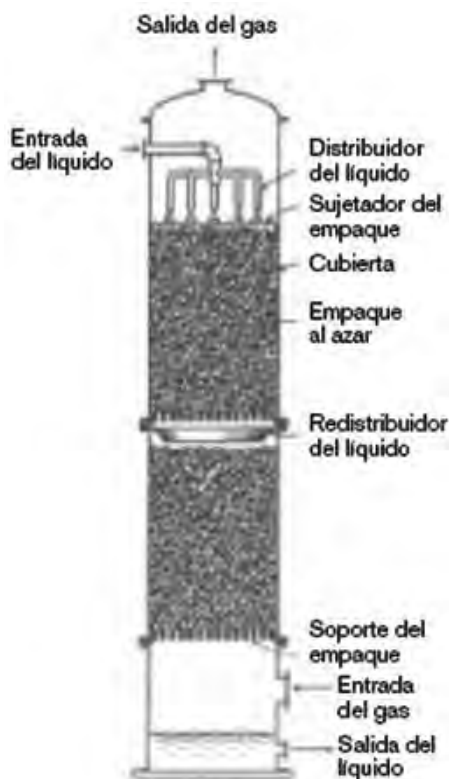


Figura 2: Columna de absorción. Torre empacada.

Absorción química en líquidos

En la operación de absorción de gases, una mezcla gaseosa se pone en contacto con un líquido, a fin de disolver de manera selectiva uno o más componentes del gas y de obtener una solución de estos en el líquido. Estas operaciones requieren la transferencia de masa de una sustancia en la corriente gaseosa al líquido y se aplica cuando se quiere recuperar en un líquido componentes que acompañen el afluente gaseoso de un reactor, bien sea para conseguir su neutralización, o para evitar la contaminación del medio ambiente. Cuando la transferencia de masa sucede en la dirección opuesta, es decir, del líquido al gas, la operación se conoce como desorción (13).

Muchos procesos industriales de absorción van acompañados de una reacción química. Aunque el proceso general se considera heterogéneo, la reacción química es realmente homogénea, y ocurre en la fase líquida, que es lo más común, en la fase gas o muy raramente en ambas fases simultáneamente. Algunas veces, tanto el reactivo como el producto de la reacción son solubles en el líquido. La reacción entre el soluto absorbido y un reactivo produce dos hechos favorables a la rapidez de la absorción: el aumento de la capacidad de adsorción del líquido respecto al componente gaseoso, y el aumento de la velocidad global del proceso (14).

Las instalaciones utilizadas para estos procesos industriales son las columnas de absorción con un lecho fijo de relleno, o torre empacada (figura 2).

Al existir el contacto directo entre el gas y el líquido, se puede beneficiar en el enfriamiento del gas caliente. En las torres empacadas y de aspersión en contracorriente, los fluidos están en contacto continuo durante su trayectoria a través de la torre. Por lo tanto, en una torre empacada las composiciones del líquido y del gas cambian continuamente con la altura del relleno. La caída de presión para la fase gaseosa es relativamente baja en comparación con otros tipos de torres, por lo que las torres de relleno son muy adecuadas para tratar caudales elevados de gas y en procesos de baja presión, y proporcionan una baja retención del líquido, lo cual es importante cuando el líquido se deteriora a altas temperaturas (14).

Métodos criogénicos

El CO_2 puede ser condensado y separado de gases poco o menos condensables a bajas temperaturas y altas presiones. El proceso total consta de condensación y destilación criogénica (CDC). Los gases de combustión son secados y comprimidos a la entrada y el gas seco es refrigerado en una columna de condensación con el objetivo de recobrar el CO_2 condensado. El método CDC se emplea para la eliminación de CO_2 en mezclas de CH_4/CO_2 y otros gases empleados en la recuperación de hidrocarburos de fuentes naturales. La eficiencia de control de una instalación CDC es de 70 % a 85 %. Este proceso requiere un consumo elevado de energía cuando la concentración de CO_2 en los gases de entrada es bajo (6).

Adsorción física en sólidos

En la adsorción, el CO_2 es retenido en el sólido debido a las interacciones con la superficie de las partículas y su porosidad. En este proceso se trabaja en condiciones casi isotérmicas, y la operación consta de dos fases: la adsorción, que se realiza a alta presión, con objeto de que la presión parcial del gas al ser capturado sea elevada, y la recuperación, que se realiza a una presión menos elevada, para liberar y recuperar el CO_2 adsorbido.

Estos procesos de captura y recuperación de gas por adsorción tienen un gran interés técnico, económico y comercial (6). La captura y recuperación de CO_2 de los gases de combustión puede llevarse a cabo por procesos de adsorción en sólidos químicamente reactivos y no reactivos.

Para la absorción del CO_2 deberían ser considerados adsorbentes sólidos naturales como yesos y zeolitas; aceite bituminoso de desecho; adsorbentes procesados como sílice, zeolitas y tamices moleculares; y por último el carbón, el lignito y la antracita.

Absorción física en líquidos

En este proceso el componente a eliminar de la corriente de gas es más soluble en el líquido que los demás componentes, pero no hay reacción química con el absorbente. La concentración en la fase líquida depende de la presión parcial del componente en la fase gaseosa.

Separación mediante membranas selectivas

La difusión de gases de distintos tamaños moleculares se puede llevar a cabo por mediación de membranas. Este método evita la necesidad de cambios de fase. Las membranas para la absorción de gases constan de un líquido de absorción en contacto con una membrana semipermeable con objeto de proveer una gran superficie de contacto y evitar mezclar el gas con el líquido. La separación se basa en la distinta velocidad de difusión de diferentes gases. El CO_2 , siendo una molécula triatómica, puede separarse con relativa facilidad de moléculas diatómicas como O_2 y N_2 (14).

Las membranas para la separación de gases pueden dividirse en dos tipos: membranas orgánicas y membranas inorgánicas.

Las membranas orgánicas apropiadas para la separación de CO_2 del N_2 incluyen materiales derivados de la celulosa, de los polisulfonatos y de las poliamidas (14).

Las membranas no orgánicas son químicamente estables y apropiadas para la operación a presión elevada, pero son más caras que las de tipo orgánico. Ejemplos de este tipo de membranas son las membranas porosas inorgánicas, como membranas cerámicas, membranas de óxidos metálicos y membranas inorgánicas no porosas, tales como membranas metálicas. Debido a que la diferencia de tamaño y masa de N_2 y CO_2 es pequeña, las membranas inorgánicas porosas no son adecuadas para la separación de CO_2 de gases de combustión.

En la configuración con una membrana, esta separa los gases de combustión en un permeado rico en CO_2 y una fracción pobre en este. La segunda es descomprimida en una cámara de expansión y liberada, subsecuentemente, a la atmósfera. El permeado rico en CO_2 es comprimido a una presión de 8 MPa. El permeado obtenido en un sistema consistente de una membrana solamente produce un permeado rico en CO_2 diluido con N_2 . Este no es un resultado deseable, ya que el CO_2 se condensará al ser comprimido, mientras que el N_2 permanecerá en forma gaseosa (14).

Estrategias para la reducción de emisiones

Están siendo exploradas tres opciones para estabilizar los niveles atmosféricos de gases invernaderos:

1. Mejoras en eficiencia en el proceso de combustión, conversión energética.
2. Empleo de combustibles cuyos productos de combustión tengan una proporción de $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ más baja.
3. Captura y recuperación del CO_2 procedente de los gases de combustión, antes de que sean liberados a la atmósfera, utilizando sustancias químicas y sistemas físicos o biológicos.

La tercera opción, es de tipo correctivo, mientras que las dos primeras son de tipo preventivo (15).

La captura y almacenamiento de carbono (CCS, por sus siglas en inglés) podría reducir las emisiones de gases de efecto invernadero capturando el dióxido de carbono donde se produce y almacenándolo de forma permanente en formaciones geológicas profundas, en las masas de aguas profundas, o en forma de minerales carbonatos. En el caso del almacenamiento oceánico profundo, existe el riesgo de aumentar enormemente la acidificación de los mares, problema que se deriva también del exceso de dióxido de carbono presente ya en la atmósfera y los océanos. Las formaciones geológicas son consideradas actualmente los sitios más plausibles de secuestro de carbono. La Agencia Internacional de la Energía (IEA) cree que aplicar la tecnología de CCS en plantas de combustibles fósiles y otras instalaciones industriales podría reducir drásticamente las emisiones de gases de efecto invernadero. La IEA espera ver más de 3 000 plantas con instalaciones de CCS operativas para mediados de siglo y alcanzar así el objetivo de reducir un 20 % las emisiones de CO_2 . Sin embargo, no hay proyectos a gran escala operando ahora mismo en plantas eléctricas, debido a que no hay una política climática vinculante y la implementación de esta tecnología es costosa (16).

El sistema por el que las empresas obtendrían beneficios al intentar reducir las emisiones nunca ha llegado a tomar forma, y sería imprescindible dados los altos costos de los proyectos de CCS. En la tabla 4 se muestra la estimación de costos de algunos sistemas de CCS. Los problemas actuales de los proyectos de CCS están ligados a la crisis económica mundial que dificulta las inversiones. Otro obstáculo es el fracaso de los gobiernos internacionales a la hora de alcanzar un acuerdo climático que sustituya al Protocolo de Kioto (17).

Los costos se calcularon teniendo en cuenta la energía de plantas nuevas y grandes. Los costos del ciclo combinado con gas natural se basan en los precios de este gas de US \$/GJ 2,80-4,40. Los costos de energía para carbón pulverizado y ciclo combinado integrado con gasificación se basan en los costos del carbón bituminoso de US \$/GJ 1-1,50. Debe tenerse en cuenta que los costos dependen en

Tabla 4. Estimación de costos de los sistemas de CCS

	Ciclo combinado de gas natural gas	Carbón pulverizado	Ciclo combinado integrado con gasificación
Sin captura (planta referencia)	0,03 – 0,05	0,04 – 0,05	0,04 – 0,06
Con captura y almacenaje geológico	0,04 – 0,08	0,06 – 0,10	0,06 – 0,09
Costo de captura y almacenaje geológico	0,01 – 0,03	0,02 – 0,05	0,02 – 0,03
Con captura y recuperación mejorada de petróleo	0,04 – 0,07	0,05 – 0,08	0,04 – 0,08

gran medida de los precios del petróleo, que cambian continuamente y otros factores no menos importantes como los costos del capital (18).

Compromiso de EE.UU. y China en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero

China y Estados Unidos anunciaron el 12 de noviembre de 2014, en la cumbre de la Cooperación Económica Asia-Pacífico en Pekín, sus planes para reducir sustancialmente sus emisiones de gases de efecto invernadero, lo que podría significar un avance histórico en los esfuerzos internacionales para limitar el cambio climático (24).

El presidente Barack Obama se comprometió a reducir las emisiones totales de gases de efecto invernadero de los Estados Unidos para el año 2025, entre un 26 % y un 28 % por debajo de los niveles de 2005. China por su parte va a poner fin al crecimiento de sus emisiones a más tardar en 2030, el primer compromiso de China, el mayor contaminador del mundo, es poner un límite a sus crecientes emisiones de gases de efecto invernadero (23).

Para lograr estos objetivos de recorte de emisiones, China aumentará hasta el 20 % la proporción de fuentes no contaminantes en su consumo total de energía para 2030, ahora no alcanza el 10 %. Esto obligará a la segunda economía mundial a poner en funcionamiento para ese año una capacidad generadora de 800 a 1 000 gigavatios de energías no contaminantes: solar, eólica y nuclear, entre otras; lo que significa más que todas las plantas alimentadas por carbón que existen hoy (26).

Por su parte Estados Unidos reducirá las emisiones de gases de efecto invernadero de las cen-

trales eléctricas existentes. La promulgación de nuevas normas para vehículos más eficientes y el uso eficaz de la energía ayudará al país a cumplir su compromiso climático. La captura y almacenamiento de carbono, siempre que sea técnicamente viable, también podría jugar un papel, pero la tecnología está todavía en desarrollo (25).

La UE acordó reducir sus emisiones colectivas por lo menos el 40 % para el año 2030, en relación con los niveles de 1990 (25).

Solo queda esperar por los acuerdos de la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, en marzo de 2015, fecha límite para presentar planes de reducción de gases de efecto invernadero en un acuerdo climático global que entraría en vigor en 2020 (27). Los detalles de ese acuerdo, un sucesor del Protocolo de Kioto de 1997, han de estar finalizados en diciembre de 2015, en las conversaciones climáticas de la ONU en París (23).

CONCLUSIONES

EL proceso de recuperación de dióxido de carbono tiene gran importancia actualmente, pues así se deja de emitir a la atmósfera una cantidad considerable de este gas que provoca el efecto invernadero, el cual atenta contra la vida en el planeta, utilizándose este gas en procesos industriales y diversas aplicaciones. Es de suma importancia que se tome conciencia de esta situación para implementar medidas amigables con el medio ambiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Emisiones de dióxido de carbono por el hombre. [en línea] <<http://www.lenntech.es/dioxido-de-carbono.htm>> [Consulta: Septiembre 2014]
2. Historia. [en línea] <<http://encyclopedia.airliquide.com/encyclopedia>> [Consulta: Abril 2014]
3. Orígenes [en línea] <<http://www.cryoinfra.com/productos-y-servicios/gases/bioxido-de-carbono-co2>> [Consulta: Mayo 2014]

4. Propiedades del dióxido de carbono [en línea] <http://www.mtc.gob.pe/portal/consultas/cid/boletines_cid/17_diciembre/archivo/co2.pdf> [Consulta: Mayo 2014]
5. Propiedades físicas del dióxido de carbono [en línea] <<http://www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2007/02/07/58813>> [Consulta: Mayo 2014]
6. Sánchez, J. Planta de recuperación del dióxido de carbono de los gases de combustión. [en línea] <<http://www.tecnicaindustrial.es/tiadmin/numeros/21/35/a35.pdf> artículo de pdf a-35.> [Consulta: Junio 2014]
7. Beltrán, S. Entrevista sobre las propiedades del CO₂ y su uso en la industria. [en línea] <http://oilandgas.dow.com/pdf/rio/ELEVATE_CO2_EOR_Conformance_Solution.pdf > [Consulta: Junio 2014]
8. Kvaerner Asa, P.O. Un método para eliminar e impedir las emisiones a la atmósfera de dióxido de carbono (CO₂) de gases de escape de motores térmicos. Ronning, Svein O.; Bjerve, Yngvil; Falk-Pedersen, Olav; Glittum, Geir; Bolland, Olav. Noruega, patente de invención NO2118574, 1995-02-14.
9. Mosquera, D. Análisis de emisiones de CO₂ para diferentes combustibles en la población de taxis en Pereira y Dosquebradas. *Scientia et Technica* 16 (45):p.141-146, 2010.
10. White, M.; Strazisar, B.; Granite, E.; Hoffman, J. Separation and capture of CO₂ from large stationary sources and sequestration. *J Air Waste Management Assoc*, 53 (6): p .645-715, 2003.
11. Álvarez, C. Aplicaciones del CO₂. [en línea] <http://www.mhimex.com/cms/index.php?option=com_content&view=article&id=170:recuperacion-de-dioxido-de-carbono&catid=52&Itemid=137> [Consulta: Septiembre 2014]
12. Núñez, Y. Producción de hielo seco [en línea] <<http://www.ascoco2.com/es/productos/recuperacion-de-CO2-para-la-produccion-de-hielo-seco/>> [Consulta: Septiembre 2014]
13. Sociedad Española de Carburros Metálicos, S.A. Procedimiento para la obtención de CO₂ y N₂ a partir de los gases generados en un motor o turbina de combustión interna. Pascual Mercader, Juan; Rivera Vilamañan, Pablo. España, patente de invención ES 2003265, 1987-04-21.
14. Hao Hsu, C.; Hsin, C.; Chornng, M. Absorption and reaction kinetics of amines and ammonia solutions with carbon. *J Air Waste Management Assoc*, 53 (2): p.246-252, 2003.
15. Guevara, M. Captura de CO₂ [en línea] <<http://www.greenfacts.org/es/captura-almacenamiento-co2/l-2/3-captura-CO2.htm>> [Consulta: Agosto 2014].
16. Saraiba, J. Captura y almacenamiento de CO₂. [en línea] <<http://josesarachaga.jimdo.com/captura-y-almacenamiento-de-CO2/>> [Consulta: Agosto 2014].
17. Álvarez, A. Reutilización de CO₂ [en línea] <<http://blogs.elpais.com/eco-lab/2011/01/la-reutilizaci%C3%B3n-del-CO2/comments/page/2/>> [Consulta: Agosto 2014].
18. Desideri, U.; Corbelli, U. CO₂ capture in small size cogeneration plants: technical and economical considerations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 39 (9):p.857-867, 1998.
19. Jerraud, M. Subida acelerada de la concentración de dióxido de carbono. [en línea] <<http://www.excelsior.com.mx/global/2014/09/09/980782>> [Consulta: Febrero 2015]
20. Betancuort, A. El cambio en el clima del planeta [en línea] <<http://www.juntadeandalucia.es/averroes/html/adjuntos/2007/09/17/0008/cambclim.htm>> [Consulta: Febrero 2015]
21. Otero, M.A.; Faife, E.; Álvarez, A. Impacto ambiental de la producción de agro-combustibles. *ICID-CA sobre los derivados de la caña de azúcar* 45(2): p. 19-27. 2011.
22. Trabajando con dióxido de carbono. [en línea] <http://www.abellolinde.es/internet.lg.lg.esp/es/imagenes/CS_12_%20v%2012%20%28trabajando%20con%20di%C3%B3xido%20de%20carbono%29316_25938.htm> [Consulta: Febrero 2015]
23. Acuerdo climático entre Estados Unidos y China. [en línea] <[http://www.scientificamerican.com/espanol/noticias/que-significa-el-acuerdo-climatico-entre-estados-unidos-y-china/Qué significa el acuerdo climático entre Estados Unidos y China?](http://www.scientificamerican.com/espanol/noticias/que-significa-el-acuerdo-climatico-entre-estados-unidos-y-china/Qué%20significa%20el%20acuerdo%20climático%20entre%20Estados%20Unidos%20y%20China%3F)> [Consulta: Febrero 2015]
24. China y EE.UU. se comprometen a reducir sus emisiones de efecto invernadero. [en línea] <<http://www.rtve.es/noticias/20141112/china-se-compromete-reducir-emisiones-efecto-invernadero-alrededor-2030/1046300.shtml>> [Consulta: Febrero 2015]
25. Histórico acuerdo de China y EEUU para limitar la emisión de gases de efecto invernadero. [en línea] <<http://www.telam.com.ar/notas/201411/84994-barack-obama-jinping-xi-beijing-china-cambio-climatico-estados-unidos.html>> [Consulta: Febrero 2015]
26. China, cada vez más contaminada. [en línea] <http://www.clarin.com/mundo/China-vez-contaminada_0_940106194.html> [Consulta: Febrero 2015]
27. China se compromete por primera vez a reducir emisiones contaminantes. [en línea] <http://internacional.elpais.com/internacional/2014/11/12/actualidad/1415769117_040119.html> [Consulta: Febrero 2015]