

ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS EN LA DISOLUCIÓN DE CO₂ EN AGUA DE MAR A BAJA PRESIÓN A BORDO DE SUBMARINOS

Pedro Antonio CASAS ALCAIDE
Doctor ingeniero naval por la UPM

Resumen



L contenido de este artículo está basado en una tesis doctoral del autor (Casas: 2012) sobre la eliminación del CO₂ que produce la planta propulsora de un submarino navegando en inmersión, siendo el objetivo aquí exponer parte de los resultados obtenidos en un estudio comparativo sobre las alternativas existentes actualmente en relación con uno de los componentes básicos de cualquier sistema de eliminación de CO₂: el subsistema de disolución en agua de mar.

Introducción

Una planta AIP es cualquier sistema propulsor capaz de posibilitar la navegación de un vehículo submarino bajo la superficie del mar de forma completamente independiente de la atmósfera terrestre.

El uso de plantas AIP a bordo de submarinos, basadas en la reacción química entre un hidrocarburo y oxígeno (ambos almacenados en el interior del submarino), da lugar a la producción en grandes cantidades de agua y CO₂, residuos que necesitan ser eliminados. En concreto, la producción de CO₂ en grandes cantidades (y en estado gaseoso) constituye un auténtico problema en un submarino navegando en inmersión, ya que actualmente no resulta viable almacenarlo a bordo y su eliminación tiene que llevarse a cabo de forma discreta y con un coste energético reducido.

Actualmente, hay varias alternativas para eliminar el CO_2 producido en la propulsión de un submarino navegando en inmersión (Potter: 2000), considerándose una de las más ventajosas la disolución de dicha sustancia en agua de mar y su posterior expulsión al exterior del submarino. Esta alternativa consta básicamente de tres etapas bien definidas:

- *Etapa 1.* Introducir agua de mar a bordo del submarino, haciendo bajar su presión desde la existente en el exterior hasta la presión a la que se quiere realizar el proceso de disolución.
- *Etapa 2.* Llevar a cabo el proceso de disolución a presión constante e independiente de la existente en el exterior del submarino.
- *Etapa 3.* Expulsar fuera del submarino el agua de mar saturada de CO_2 haciendo subir su presión desde la correspondiente al proceso de disolución hasta la existente en el exterior.

Para ejecutar la etapa 2 de forma silenciosa y sin ocupar excesivo volumen, resulta necesaria la instalación de un sistema de disolución de CO_2 en agua de mar a baja presión, el cual puede implementarse mediante el uso de membranas microporosas.

Aunque la tesis también ha incluido un estudio comparativo sobre los sistemas de recuperación de energía necesarios para llevar a cabo las etapas 1 y 3, este artículo se va centrar únicamente en presentar parte de los resultados obtenidos en un estudio comparativo sobre las ventajas/inconvenientes de las diferentes alternativas existentes en relación con los sistemas de disolución basados en membranas microporosas, teniendo en cuenta las singularidades propias de su instalación a bordo de submarinos.

Sistemas de disolución de CO_2 en agua de mar a baja presión

El agua de mar es capaz de admitir en disolución cantidades apreciables de CO_2 (aproximadamente 1,7 kilogramos por cada metro cúbico de agua, a 10^5 Pa y 293 K) y, de hecho, el problema de la disolución de grandes cantidades de CO_2 en soluciones acuosas ha cobrado un auge significativo en los últimos años en relación con problemas de tipo medioambiental (Dortmundt: 1999; Kumar: 2002, y Svendsen: 2001).

El uso de membranas porosas para disolver grandes cantidades de CO_2 a baja presión constituye una alternativa muy interesante de cara a su aplicación a bordo de submarinos, pues los sistemas correspondientes son de bajo volumen, silenciosos y permiten un funcionamiento de la planta AIP independiente del valor de la presión externa.

Cualquier sistema de disolución basado en membranas microporosas admite dos regímenes de funcionamiento intrínsecamente distintos:

- *Difusión*: este principio funcional se basa en la difusión directa del CO_2 en el agua a través de la superficie de contacto que se forma en los poros microscópicos de una membrana hidrofóbica (es decir, una membrana cuyo material no acepta en su seno ni la difusión física ni la reacción química con el agua) sin que se produzca burbujeo alguno, siendo posible la formación de una interfase estable gracias a los fenómenos de tensión superficial que se inducen en la misma
- *Burbujeo*: este principio funcional se apoya en la dispersión física de una serie de burbujas gaseosas como paso previo a su disolución final, siendo posible la formación de las citadas burbujas gracias a la circulación del gas a través de unas membranas porosas que sirven como sistemas de generación de interfase.

El objetivo fundamental es llevar a cabo un análisis comparativo para determinar las ventajas/inconvenientes de cada una de las alternativas consideradas, siendo de interés secundario la obtención de resultados extremadamente exactos. Por tanto, la disposición geométrica de los sistemas a estudiar deberá ser lo más sencilla posible, al objeto de poner de manifiesto claramente las características intrínsecas subyacentes en cada uno de ellos.

En consecuencia, las disposiciones geométricas que se van a considerar son únicamente las dos que aparecen a continuación:

Batería de membranas planas colocadas en paralelo (Tipo MP)

Esta disposición geométrica es completamente análoga a la disposición de los intercambiadores térmicos de placas existentes en el mercado y, en esencia, consiste en crear finas capas alternativas de circulación de agua y CO_2 separadas por membranas planas, lo que permite la difusión/dispersión de esta última sustancia hacia la fase líquida a través de los poros de las membranas.

Para lograr lo anterior se procede a separarlas mediante la colocación de unos bastidores de poco espesor dispuestos al efecto y diseñados especialmente para posibilitar la distribución de fluido por todo el siste-

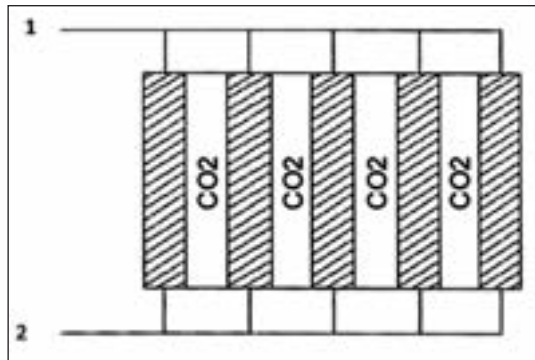


Fig. 1. Batería de membranas planas colocadas en paralelo (1. Entrada de agua de mar, 2. Salida de agua de mar saturada de CO_2).

ma, empernándose finalmente todo el conjunto para dotarlo de la adecuada resistencia estructural.

En la disposición esquemática de la figura 1, el agua de mar circula por las capas entrando por la parte superior y saliendo por la parte inferior, mientras que el CO_2 gaseoso entra en la batería perpendicularmente al plano de la figura.

Columna de líquido con circulación hidrostática (Tipo CL)

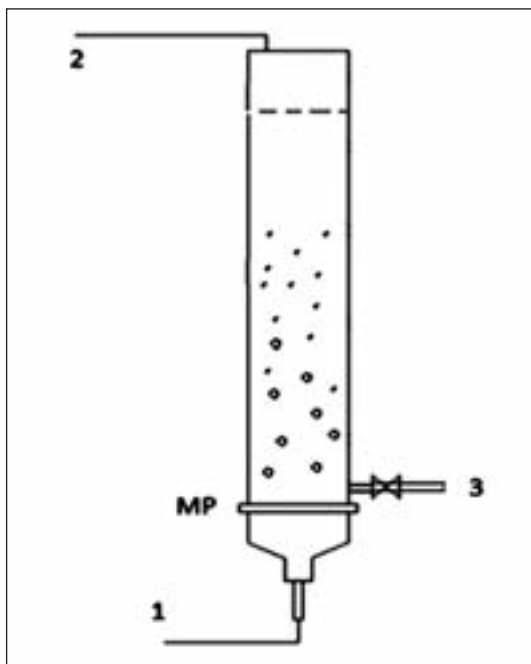


Fig. 2. Columna de líquido (1. Entrada de gas, 2. Salida de recuperación de gas, 3. Entrada/salida de agua, MP. Membrana porosa).

Esta disposición geométrica es extremadamente simple, y consiste en un cilindro vertical lleno de agua en el que se hace burbujear el gas introducido por la parte inferior a través de una membrana porosa colocada al efecto (el tamaño de poro de la membrana tiene una relación directa con el tamaño de las burbujas formadas, las cuales circulan en sentido ascendente impulsadas por su propia flotabilidad). Un esquema de tal disposición puede verse en la figura 2.

Independientemente de la disposición geométrica elegida, tanto la fase líquida como la gaseosa pueden circular por el sistema en dos formas alternativas:

Fase líquida

- *Circulación continua.* El agua circula de forma ininterrumpida por el interior del sistema y en contacto permanente con la fase gaseosa, aumentando gradualmente su nivel de concentración de CO_2 desde que entra hasta que sale del sistema.
- *Circulación por lotes.* El agua es introducida de forma periódica en el sistema, donde permanece en contacto con la fase gaseosa, y sin reno-

vacación alguna, hasta que el nivel de CO_2 disuelto en la misma alcanza el valor establecido. En ese momento, se introduce un lote nuevo de agua de mar pura a la vez que se extrae el lote que se ha ido saturando de CO_2 durante el tiempo de residencia del agua en el interior del sistema, dando lugar al comienzo de un ciclo nuevo.

Fase gaseosa

- *Circulación con recuperación parcial.* La cantidad de gas que entra en el sistema es superior a la cantidad que se disuelve en el agua, existiendo un excedente de gas más o menos grande que sale del sistema de disolución, y que por tanto es recuperado parcialmente (esta forma de circulación de la fase gaseosa es inevitable cuando el CO_2 va mezclado con otros gases que no resultan necesarios eliminar).
- *Circulación sin recuperación.* Todo el gas que entra en el sistema es eliminado mediante su disolución en el agua de mar, sin recuperación alguna.

En el estudio comparativo, mencionado en la introducción, únicamente se han considerado los tres casos que aparecen a continuación:

- *Sistemas tipo I.* Con geometría tipo MP funcionando en régimen de difusión con circulación continua de la fase líquida y sin recuperación de fase gaseosa.
- *Sistemas tipo II.* Con geometría tipo MP funcionando en régimen de burbujeo con circulación continua de la fase líquida y sin recuperación de fase gaseosa.
- *Sistemas tipo III.* Con geometría tipo CL funcionando en régimen de burbujeo con circulación por lotes de la fase líquida y con recuperación parcial de la fase gaseosa.

Observación 1.—*Es interesante hacer notar que el transporte de masa por burbujeo necesita un gradiente de presión mínimo (cuyo valor es función directa de la tensión superficial del agua) en el sentido de la circulación del CO_2 a través de la membrana, sin el cual no es posible la formación (y posterior dispersión) de burbujas en el seno del flujo de agua. Por el contrario, el transporte de masa por difusión puede producirse de forma independiente al sentido del gradiente de presión a través de la membrana, ya que la fuerza motriz que impulsa la circulación de gas es la diferencia de potencial químico a ambos lados de la membrana, y no la diferencia de presión.*

Modelado matemático

Sin entrar en la descripción detallada de los modelos desarrollados en la tesis, merece la pena presentar una serie de reflexiones en relación con este tema, ya que ha planteado un reto bastante importante.

Los modelos matemáticos encontrados en la bibliografía presentan en general alguno (en ciertos casos ambos) de los dos inconvenientes que aparecen a continuación:

- No se prestan fácilmente a la realización de comparaciones entre sistemas de disolución de CO_2 con disposiciones geométricas muy distintas.
- Están pensados para estudiar en detalle los fenómenos que se producen en el interior de los diferentes sistemas, presentando una complejidad que dificulta en gran medida la ejecución de estudios comparativos sencillos.

En consecuencia, ha sido necesario desarrollar modelos específicos para cada uno de los tres sistemas analizados, manteniendo al mismo tiempo una estructura común que facilitase la ejecución de estudios comparativos.

El resultado obtenido constituye un logro notable, siendo compacto, fácil de implementar mediante código SW y dando lugar a tiempos de ejecución en máquina extraordinariamente reducidos.

Resultados obtenidos

Se presenta a continuación un resumen de los resultados más relevantes obtenidos en el estudio comparativo mencionado en la introducción:

- *Resultado 1.* En todos los sistemas de disolución analizados, su rendimiento puede caracterizarse mediante la expresión siguiente:

$$\eta = 1 - \exp\left(-k_1 D_1 \frac{V}{Q_1}\right)$$

en donde la forma que adopta el parámetro k_1 (con dimensiones de m^2) depende del sistema de disolución considerado.

- *Resultado 2.* En los sistemas de disolución tipo II, las capas de circulación de agua deben tener una longitud mínima de unos 128 m aproximadamente. Independientemente de cualquier otra consideración, esta restricción de diseño es tan fuerte que, a efectos prácticos, elimina la posibilidad de usar estos sistemas a bordo de submarinos.

- *Resultado 3.* El parámetro k_l (ver resultado 1) se mantiene en todos los casos considerados por debajo de un valor límite superior, a saber:
- Sistema tipo I: $k_l = 8 \cdot 10^7 \text{ m}^2$
 - Sistema tipo II: $k_l = 3.75 \cdot 10^6 \text{ m}^2$
 - Sistema tipo III: $k_l = 7.5 \cdot 10^6 \text{ m}^2$

A la vista de los valores límite arriba indicados, se llega a una conclusión interesante: tomando el mismo caudal de agua y el mismo rendimiento para todas las alternativas, el funcionamiento en régimen de burbujeo (sistemas tipo II y III) necesita un volumen total para el módulo de disolución al menos de un orden de magnitud superior que el funcionamiento en régimen de difusión (sistemas tipo I).

Observación 2.—Es interesante hacer notar que este resultado contradice lo que indica la intuición, ya que en principio parece lógico esperar que el diámetro de las burbujas obtenidas sea similar al de los poros de las membranas, lo cual permitiría jugar con este parámetro para mejorar el rendimiento de los sistemas tipo II y III. Sin embargo, no ocurre así en la práctica, pues los datos que aparecen en Parthasarathy (1996) demuestran la existencia de un diámetro crítico que no es posible reducir de ninguna manera.

- *Resultado 4.* En relación con los sistemas considerados, se han determinado tres formas básicas de regular el funcionamiento de los mismos para adaptarlo a la cantidad de CO_2 que debe disolverse (variable según la potencia requerida por la planta propulsora del submarino en cada momento):
- Regulación Tipo P: la cantidad de CO_2 disuelto se ajusta mediante la variación de la presión existente en la zona de gas, manteniéndose constantes tanto el caudal de agua de circulación como las condiciones internas de funcionamiento (parámetro k_l mencionado en el resultado 1).
 - Regulación Tipo Q: la cantidad de CO_2 disuelto se ajusta mediante la variación del caudal de agua que circula por el sistema, manteniéndose constantes tanto la presión existente en la zona de gas como el citado parámetro k_l .
 - Regulación Tipo K: la cantidad de CO_2 disuelto se ajusta mediante la variación de las condiciones internas de funcionamiento (es decir, variando el parámetro k_l arriba citado), manteniéndose constantes tanto la presión existente en la zona de gas como el caudal de agua de circulación.

Se hace notar que la regulación tipo P mantiene un valor constante del rendimiento en todo momento, mientras que los dos últimos tipos de regulación (Q y K) hacen que el rendimiento varíe en función de la potencia requerida por la planta propulsora.

Esto último significa que tanto con la regulación tipo Q como con la tipo K el grado de concentración de CO_2 existente en el agua que abandona el submarino va a resultar variable, pero a cambio permite el funcionamiento de la planta AIP bajo presión constante, cosa que es intrínsecamente imposible con la regulación tipo P.

- *Resultado 5.* Con el estado del arte actual en membranas microporosas resulta posible establecer las afirmaciones siguientes:
 - Sistemas tipo I: este tipo de sistemas muestra un comportamiento excelente en todos los aspectos considerados, demostrando que el funcionamiento en régimen de difusión es enormemente superior a cualquiera de las alternativas funcionando en régimen de burbujeo.
 - Sistemas tipo II: este tipo de sistemas ha resultado claramente inadecuado, pudiendo descartarse directamente su utilización en aplicaciones a bordo de submarinos.
 - Sistemas tipo III: estos sistemas muestran un comportamiento superior al tipo II, a pesar de lo cual siguen siendo inferiores al tipo I, sobre todo en relación con el rendimiento y la sensibilidad a los movimientos del submarino.

Conclusiones y comentarios finales

En general, se han establecido dos conclusiones importantes:

- El sistema tipo I ha resultado ser mucho mejor que los otros dos, demostrando la superioridad del funcionamiento en régimen de difusión frente al burbujeo, al menos con el estado actual de la tecnología en el campo de las membranas porosas.
- El sistema tipo II ha resultado ser claramente inadecuado, pudiendo descartarse directamente en aplicaciones a bordo de submarinos.

Puede decirse que el uso de membranas microporosas funcionando en régimen de difusión para disolver CO_2 en agua de mar se ha revelado como una solución enormemente atractiva para su instalación a bordo de submarinos dotados de plantas AIP, existiendo actualmente equipos comerciales totalmente disponibles al efecto.

Finalmente, cabe decir que:

- El desarrollo teórico necesario para la consecución de los resultados presentados es una contribución original (no está disponible en la literatura existente al respecto) que ha servido de base para la elaboración de un artículo que se encuentra actualmente publicado en una revista del JCR (Martínez: 2012) y constituye una aportación fundamental para cualquier organismo involucrado en la adquisición de submarinos dotados con plantas AIP.
- El estudio comparativo mencionado en la introducción ha dado lugar a resultados mucho más amplios que los aquí expuestos, los cuales no han sido incluidos dado el carácter divulgativo de este artículo y la excesiva extensión que hubiera sido necesaria.

Nomenclatura

- D_c : coeficiente de difusión del CO_2 en agua (m^2/s).
- Q_l : caudal de la fase líquida (m^3/s).
- V : volumen total del sistema (m^3).
- η : rendimiento de disolución (-).

BIBLIOGRAFÍA

- POTTER, I. J.; CLAVELLE, E.; READER, G. T.; KADY, J., y CARL, M.: 2000, *Exhaust gas management systems for underwater heat engines*. IEEE 0-7803-6378-7.
- DORTMUNDT, D., y DOSHI, K.: 1999, *Recent developments in CO_2 removal membrane technology*. UOP-Illinois.
- KUMAR, P. S.: 2002, *Development and design of membrane gas absorption processes*. Twente University Press. Tesis doctoral.
- SVENDSEN, H. F.; HOFF, K. A.; POPLSTEINOVA, J., y DA SILVA, E. F.: 2001, *Absorption as a method for CO_2 capture*. Second Nordic Symposium on CO_2 Capture and Storage, Goteborg.
- MARTÍNEZ, I., y CASAS, P. A.: 2012, «Simple model for CO_2 absorption in a bubbling water column». *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol. 29, núm. 1.
- CASAS, P. A.: 2012, *Eliminación de dióxido de carbono en la propulsión de submarinos*. Universidad Politécnica de Madrid. Tesis doctoral.
- PARTHASARATHY, R., y AHMED, N.: 1996, «Size distribution of bubbles generated by fine-pore spargers». *Journal of Chemical Engineering of Japan*, vol. 29.