



Diseño de Unidad de Almacenamiento de CO₂ en estado sólido

Autor: Cristina Vázquez Hernández

Institución: Universidad de Oviedo

Otros autores: Jose Pablo Paredes Sánchez (Universidad de Oviedo); Jorge Xiberta Bernat (Universidad de Oviedo); Eunice Villicaña Ortiz (Universidad de Oviedo).

Resumen

El cambio climático que parece sufrir actualmente nuestro planeta exige poner en marcha el mayor número de medidas complementarias que eviten la emisión de CO₂ antropogénico a la atmósfera. Dado que el dióxido de carbono es un compuesto no tóxico, no inflamable y abundante en la naturaleza, las tecnologías basadas en la utilización de CO₂ en aplicaciones presentes y con gran potencial de futuro, son una alternativa altamente estimulante que supondrán no sólo evitar que una parte del dióxido de carbono emitido llegue a la atmósfera sino transformarlo en un recurso, con el subsiguiente aporte económico que esto conlleva. La utilización de CO₂ en aplicaciones industriales, químicas y biológicas, pone de manifiesto las ventajas asociadas al uso de este compuesto frente a otros productos más nocivos para el medio ambiente. El gran potencial de desarrollo de estas aplicaciones requiere un almacenamiento temporal de dióxido de carbono hasta su posterior utilización una tecnología que actualmente presenta importantes limitaciones.

En este trabajo se presenta el diseño innovador de una unidad de almacenamiento temporal de CO₂ en estado sólido que opera en ciclo cerrado. Este estado de agregación permite que con un mínimo volumen de planta, se maximice la cantidad de producto almacenado. Con un confinamiento a presión atmosférica se reducen las tensiones de membrana y con ello el espesor requerido, lo que disminuye los costes con respecto a recipientes a presión. De igual modo, se reducen las cargas mecánicas, minimizándose así las deformaciones que pueden afectar a la seguridad y conducir a fugas, y al operar a temperaturas criogénicas desaparecen problemas de compatibilidad entre el CO₂ y el material de confinamiento, tales como corrosión o fragilización por hidrógeno. El resultado es un sistema de almacenamiento de CO₂ disponible para su aplicación de alta capacidad, muy bajo coste y seguro, con el que se tanto su degradación como las fugas a la atmósfera.

Palabras claves: CO₂; almacenamiento; sólido.

Contenido:

1. La inercia del cambio climático	3
2. Tecnologías de Captura y Almacenamiento de CO₂ (CAC)	3
3. Tecnologías de utilización de CO₂	4
4. Sistemas de almacenamiento temporal de CO₂	6
5. Diseño de la unidad de almacenamiento	8
6. Cálculo y dimensionamiento de la unidad de almacenamiento	13
7. Análisis económico	15
8. Conclusiones	15
9. Bibliografía	17

Agradecimientos

Deseo hacer un especial y reconocido agradecimiento a la Profesora. Dra. Dña. María Jesús Blanco Acebal, por su constante motivación e impulso para el desarrollo de este trabajo. Sus aportaciones y asesorías permitieron conducir la línea de investigación de forma clara, concreta y rigurosa.

1. La inercia del cambio climático

El cambio climático que sufre nuestro planeta se presenta como una evidencia incuestionable. Actualmente, numerosos estudios ponen de manifiesto la insuficiencia de las medidas de carácter nacional e internacional contra las emisiones de GEI¹ de origen antropogénico adoptadas hasta la fecha.

Las medidas complementarias para reducir las emisiones de CO₂ que resultan del proceso energético son: la eficiencia y ahorro energético, las fuentes alternativas de energía y las tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ (CAC).

2. Tecnologías de CAC

El elevado uso de combustibles fósiles, principales causantes del CO₂ antropogénico emitido a la atmósfera, sigue siendo, y lo será durante muchos años, imprescindible para el desarrollo económico y la seguridad de suministro energético. Así pues, los estudios llevados a cabo por la AIE² y la Comisión Europea ponen de manifiesto que las tecnologías de CAC en formaciones geológicas del subsuelo y océanos se perfilan como las de mayor potencial para evitar las emisiones de este gas a la atmósfera por producirse en centrales eléctricas o plantas industriales.

Actualmente, las tecnologías de captura de CO₂ están disponibles para ser incorporadas a focos de emisiones localizadas y las del transporte de CO₂ han venido operando satisfactoriamente durante las últimas décadas. Por tanto, el reto tecnológico principal radica en encontrar almacenes de CO₂ cerca del lugar de emisión, que sean seguros, tengan la capacidad necesaria y cuenten con la aceptación social.

¹GEI: gases de efecto invernadero.

² AIE: Agencia Internacional de la Energía.

Las tecnologías de CAC contemplan un almacenamiento permanente de CO₂ en el enclave elegido, ya sea geológico u oceánico. En la actualidad, existen aspectos clave por resolver en lo referente al almacenamiento permanente de CO₂, que ralentizan el futuro desarrollo de esta técnica:

- El almacenamiento de CO₂ en formaciones geológicas subterráneas se plantea como la opción más barata y aceptable desde el punto de vista medioambiental. Sin embargo, todavía existen cuestiones que deben ser resueltas. Por otra parte tenemos que los mecanismos de caracterización y selección del lugar de almacenamiento no cuentan todavía con los índices de fiabilidad deseados, las cuestiones de responsabilidad a largo plazo, los riesgos relacionados con las fugas de CO₂ a la atmósfera, y las preocupaciones a nivel local sobre el impacto ambiental y la seguridad. Además hoy en día pocos países han desarrollado marcos jurídicos y normativas específicas para el almacenamiento geológico de CO₂, y se da el caso de que países como Austria han prohibido este tipo de almacenamiento en su subsuelo.
- El almacenamiento oceánico, aún no se ha desplegado ni demostrado a escala experimental sino que continúa en fase de investigación, de modo que existen muchas cuestiones por resolver. Se ha demostrado que la inyección de CO₂ en los océanos puede disminuir el pH del agua, perjudicar a los organismos marinos, producir descargas graduales de CO₂ a la atmósfera durante siglos e incluso se teme que la inyección de grandes cantidades pueda afectar, progresivamente, al océano en su totalidad. Además, hasta el momento, no se ha adoptado ninguna decisión acerca de la condición jurídica intencional del almacenamiento oceánico y existe una falta de experiencia en la estimación de costes.
- La carbonatación mineral, que también podría convertirse en una opción de almacenamiento de CO₂; constituye la tecnología menos rentable al tratarse de un proceso lento, y que requiere una gran cantidad de energía y materiales. A pesar de ser técnicamente posible, presenta el problema añadido debido a que muchos de estos componentes liberan rápidamente su contenido de CO₂ a la atmósfera.

Ahora bien, la necesidad de poner en marcha el mayor número de medidas complementarias que eviten la emisión de CO₂ a la atmósfera, hace que las tecnologías de almacenamiento permanente del CO₂ capturado, no sean contempladas como única opción. Ante la cantidad de CO₂ que se espera que haya disponible tras su captura y separación de las fuentes de emisión y la dificultad que atañe un almacenamiento permanente de este compuesto, cabe plantearse una pregunta: ¿Por qué no aprovechar una parte del CO₂ capturado dándole un valor añadido? Las tecnologías basadas en la utilización de CO₂ se presentan como la medida complementaria en la mitigación del cambio climático, que no sólo contribuyen a reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera sino que convierte a este residuo en un nuevo recurso, con el subsiguiente aporte económico que esto conlleva.

3. Tecnologías de utilización de CO₂

En la actualidad, de las aproximadamente 25Gt anuales de CO₂ emitidas a la atmósfera por la acción del hombre, sólo 130Mt son utilizadas anualmente por la industria global en sus distintas aplicaciones. Sin embargo, es previsible un futuro crecimiento de la utilización del CO₂ como materia prima, ya que:

- El dióxido de carbono es un compuesto no tóxico, no inflamable y abundante en la naturaleza, características que lo convierten en un compuesto muy atractivo frente a otros productos más nocivos para el medio ambiente.
- Las tecnologías basadas en la utilización de CO₂, además de contribuir a la reducción de emisiones de CO₂ en la atmósfera, transforman un residuo en un nuevo recurso, creando un producto de valor añadido lo que favorece a la economía global.
- Las numerosas investigaciones llevadas a cabo hasta la fecha muestran resultados muy favorables en las posibilidades de expansión que presentan las tecnologías basadas en la utilización de CO₂.

Las aplicaciones presentes y con gran potencial de futuro de las tecnologías de utilización de CO₂, pueden dividirse en las tres categorías siguientes:

a) Usos industriales

En este apartado, destacan la extracción de compuestos con CO₂ supercrítico en industrias de alimentos, fármacos y textiles; el uso directo de CO₂ en el sector de la alimentación para la producción de bebidas carbónicas, envasado en atmósferas modificadas o protectoras, aturdimiento de animales, atmósferas modificadas para la desinsectación de alimentos, o refrigeración y congelación de alimentos; y la utilización directa de CO₂ en el tratamiento de aguas, con procesos como la neutralización de aguas residuales, la remineralización de aguas blandas y la disminución del pH de aguas de recreo. La utilización directa o tecnológica de CO₂ contribuye a la reducción de GEI en la atmósfera y sustituye a otros compuestos mucho más dañinos con el medio ambiente y que tienen una capacidad de calentamiento global muy superior. Incluso si parte del CO₂ vuelve a la atmósfera, su uso frente a otros compuestos más perjudiciales será beneficioso con el medio ambiente.

b) Usos biológicos

La utilización biológica o mejorada consiste en la fijación del CO₂ en biomasa, como por ejemplo, el cultivo de microalgas para producción de biocombustibles. Esta utilización tiene un gran potencial, especialmente si se mejora la eficiencia del proceso de bio-reactivo.

c) Usos químicos

La utilización química consiste en la conversión del CO₂ en otros productos, también llamado tecnologías C-1 y C-n. La conversión del CO₂ en productos químicos como la

urea, el AAS, los carbonatos o policarbonatos y los combustibles como metanol o gas de síntesis, son un ejemplo representativo del papel del CO₂ en la industria química.

Son muchas por tanto las posibles aplicaciones industriales que presenta la utilización del CO₂ capturado. Ahora bien, el potencial de desarrollo de estas tecnologías está limitado por algunos aspectos, siendo uno de los fundamentales, logran que el almacenamiento temporal del CO₂ capturado permita su disponibilidad en aquellas aplicaciones.

4. Sistemas de almacenamiento temporal de CO₂

El almacenamiento temporal masivo del CO₂ capturado se presenta como una etapa futura que haría posible el desarrollo a gran escala de las tecnologías de utilización de CO₂. Con este objetivo, se ha llevado a cabo un estudio sobre equipos más habituales de almacenamiento de CO₂ presentes en el mercado mundial³, analizando sus características fundamentales: volumen, configuración, materiales, fase, presión y temperatura.

De este análisis se han podido extraer las siguientes conclusiones:

- El volumen de la mayor parte de los depósitos comerciales presentes en el mercado para almacenamiento de CO₂, se encuentra en una horquilla que abarca desde los 2m³ hasta los 50m³, construyéndose a medida para volúmenes de como máximo 500t de producto almacenado.
- Las configuraciones más comunes son la disposición cilíndrica vertical y la cilíndrica horizontal, quedando la esférica para grandes instalaciones, aunque se han construido depósitos cilíndricos horizontales para contener 500t de CO₂. Para las configuraciones cilíndricas, se emplean todo tipo de fondos: esféricos, elípticos, Korboggen, etc., cuya elección depende tanto de las dimensiones y presiones a soportar como de las tubuladuras que lo atraviesan.
- Los aislamientos térmicos más utilizados son la perlita al vacío y las espumas rígidas de poliuretano. Mientras que el primero requiere un doble depósito de acero, en el segundo únicamente el depósito interno es de acero, siendo la camisa externa de aluminio. Esto implica que, si bien su coste es significativamente mayor, el nivel de aislamiento que se consigue es aproximadamente 7 veces superior.
- En cuanto a los materiales empleados, el ASTM/ASME SA 612 y el ASTM/ASME SA 516 son los más utilizados para el depósito interno. También se utilizan, pero con menor frecuencia, aceros inoxidables de tipo austenítico. Para la envolvente externa, cuando el aislamiento es de perlita en vacío, el acero más utilizado es el ASTM/ASME SA 36, seguido del ASTM/ASME SA 285.

³El análisis completo de las empresas que suministran equipos de almacenamiento temporal de CO₂ a nivel mundial, viene recogido en el "Capítulo 2.2. Almacenamiento temporal de CO₂". Proyecto Fin de Carrera "Diseño de Unidad de Almacenamiento de CO₂ en estado sólido". Autora: Cristina Vázquez Hernández.

- Respecto a la fase o estado de agregación, el almacenamiento más habitual es en condiciones criogénicas, con el CO₂ en estado líquido en equilibrio con el vapor, a presiones en torno a 20bar y temperaturas en torno a -20° C. También existen almacenamientos solamente en fase vapor, con presiones de hasta 50bar y a temperatura ambiente, e instalaciones que trabajan en condiciones supercríticas, con previsiones superiores a los 80bar y temperatura ambiente (véase *Figura 1*).

Entre las conclusiones extraídas, dos aspectos clave evidencian las importantes limitaciones que presentan las configuraciones actuales de equipos de almacenamiento temporal de CO₂: el volumen y la fase de almacenamiento.

Un volumen de almacenamiento máximo de 50 m³ está muy por debajo del que se contempla con el futuro desarrollo de las tecnologías de utilización de CO₂ a gran escala. No obstante, las fases de almacenamiento de los actuales equipos comerciales, con presiones de 20bar en fase líquida y que pueden ser más altas en fase vapor, imposibilitan el desarrollo de equipos comerciales de volúmenes mayores.

Ante limitaciones que presentan las formas actuales de almacenamiento temporal de CO₂ para el futuro desarrollo a gran escala de las tecnologías de utilización de CO₂, surge entonces la siguiente pregunta: ¿Cómo conseguir un sistema de almacenamiento temporal de CO₂ que con un mínimo volumen de planta se maximice de forma segura y coste asumible la masa de producto almacenado? La respuesta a esta cuestión es la siguiente: ¿Por qué no almacenar el CO₂ a presión atmosférica y en fase sólida? (véase *Figura 1*).

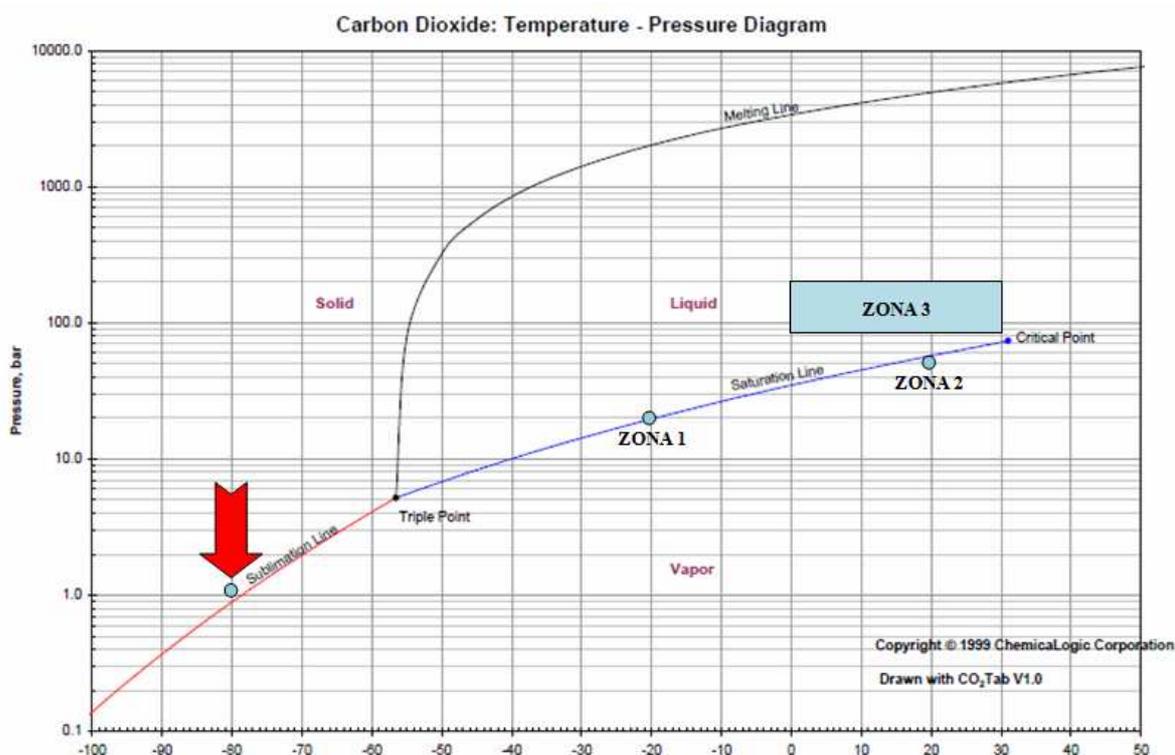


Figura 1. Condiciones de estado habituales en depósitos de CO₂

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de www.chemicallogic.com

5. Diseño de la unidad de almacenamiento⁴

La búsqueda de un sistema de almacenamiento temporal de CO₂ seguro, de alta capacidad y coste mínimo, ha dado como resultado el diseño innovador de una unidad de almacenamiento temporal de CO₂ (s)⁵ a presión atmosférica y temperatura de -80° C.

La opción por el CO₂ en estado sólido permite incrementar notablemente la cantidad de producto almacenado, dado que en dicho estado es posible almacenar un 50% más de producto que en estado líquido y un 75.000% más que en estado gaseoso.

Además, esta fase de agregación posibilita el diseño de un sistema de almacenamiento de coste mínimo. El CO₂ en estado sólido puede ser almacenado a presión atmosférica. La igualdad de presiones absolutas entre el exterior y el interior de la unidad de almacenamiento reduce las tensiones de membrana y con ello el espesor de material requerido, disminuyéndose así los costes con respecto a los recipientes a presión que se comercializan actualmente.

De igual modo, estas condiciones de presión y temperatura conducen al diseño de un sistema de almacenamiento más seguro. Con un almacenamiento a presión atmosférica se reducen las cargas mecánicas, minimizándose así deformaciones que podrían afectar a la seguridad de la unidad de almacenamiento y conducir a fugas. Además, a temperaturas criogénicas desaparecen problemas de compatibilidad tales como la corrosión o la fragilización por hidrógeno, entre el CO₂ y el material de confinamiento.

En definitiva, el resultado es un sistema de almacenamiento seguro de alta capacidad y coste mínimo, que almacena dióxido de carbono permitiendo que esté disponible para su aplicación en las tecnologías de utilización de CO₂. Se evitan así su degradación y las fugas por escape a la atmósfera con el consiguiente perjuicio medioambiental, tal y como se pone de manifiesto a continuación.

5.1 Obtención, conservación y extracción del CO₂ en estado sólido

a) *Condiciones de carga*

Esta unidad de almacenamiento puede ser alimentada con CO₂ transportado mediante las tres opciones que contemplan las tecnologías de CAC, es decir, mediante tuberías o CO₂-ductos, barcos, camiones y vagones cisterna.

A día de hoy, tanto el coste como la capacidad de volumen requerida hacen que la única opción viable a gran escala sea el transporte por tubería. Así pues, esta unidad de almacenamiento de CO₂ (s) puede ser alimentada con CO₂ a través de redes de distribución procedentes de CO₂-ductos, que transportan CO₂ en estado líquido a

⁴En el presente apartado se abordan en líneas muy generales algunas cuestiones referentes al diseño de la unidad de almacenamiento. El desarrollo completo del diseño se ha llevado a cabo en el "Capítulo 5. Diseño de la unidad de almacenamiento". Proyecto Fin de Carrera "Diseño de Unidad de Almacenamiento de CO₂ en estado sólido". Autora: Cristina Vázquez Hernández.

⁵CO₂(s): dióxido de carbono en estado de agregación sólido.

condiciones en torno a 8° C y 73bar. Este CO₂ líquido puede ser solidificado mediante una expansión adiabática; sin embargo, la reacción no es totalmente efectiva dado que una parte se evapora.

En la actualidad, las compañías que comercializan nieve carbónica o hielo seco, emplean un procedimiento de obtención de CO₂ (s) que consiste en una expansión adiabática de CO₂ en estado líquido a temperatura ambiente y presión entre 50-60bar, con un rendimiento en torno al 20%. Por tanto, teniendo en cuenta que la expansión adiabática utilizada comercialmente para la obtención de hielo seco es viable económicamente, la obtención de CO₂ (s) a partir del CO₂ (l)⁶ transportado mediante CO₂-ductos es la opción más atractiva por su mayor rendimiento.

b) Condiciones de operación

La localización de la unidad de almacenamiento es versátil. No obstante, para poder llevar a cabo su diseño, se ha elegido el puerto de Gijón en Asturias, por tratarse de un emplazamiento amplio, ofrecer múltiples opciones de transporte del CO₂ almacenado y tener condiciones ambientales favorables.

La unidad de almacenamiento estará situada a la intemperie, con lo que cuando esté operando se produciría una transferencia de calor desde el exterior que provocará la sublimación de CO₂ sólido almacenado. Para reducir al máximo el calor transferido y minimizar así el cambio de fase, se ha diseñado un sistema calorífugo que consiste en una unidad de almacenamiento doble dotada de aislamiento térmico. No obstante, esto no impedirá que una parte del CO₂ sólido almacenado sublime. A medida que este CO₂ (g)⁷ se vaya generando se pondrán en marcha válvulas de alivio situadas en la zona superior de la unidad de almacenamiento. El CO₂ (g) será extraído y transformado nuevamente a estado sólido utilizando el proceso que actualmente se emplea para la obtención de hielo seco o nieve carbónica. El CO₂ (s) generado será inyectado nuevamente en la unidad de almacenamiento, creando así un sistema cerrado de almacenamiento temporal en equilibrio de CO₂ en estado sólido.

c) Condiciones de descarga

La unidad de almacenamiento de CO₂ sólido puede abastecer directamente a puntos que desarrollen tecnologías de utilización de CO₂ en distintas aplicaciones. Presenta además la ventaja de proporcionar un suministro totalmente versátil, dado que se puede realizar en cualquiera de las tres fases en las que puede existir este compuesto.

Otra opción es emplear sistemas de transporte adicionales tales como CO₂-ductos, buques, vagones cisterna, etc. que envíen el CO₂ almacenado hasta su lugar de destino. El estado de agregación al que sea transportado será función de la distancia y las posibilidades que ofrezcan los distintos sistemas de transporte.

⁶ CO₂(l): dióxido de carbono en estado de agregación líquido.

⁷ CO₂(g): dióxido de carbono en estado de agregación gaseoso.

5.2 Sistema de almacenamiento, normativa aplicable, geometría y capacidad de almacenamiento

Las primeras cuestiones que se han abordado en el diseño de la unidad han sido el sistema de almacenamiento, la normativa aplicable y la geometría de la unidad.

a) Sistema de almacenamiento

Un almacenamiento de CO₂ en estado sólido a presión atmosférica, es decir sin presión manométrica interior, o con la mínima posible, ha permitido diseñar el sistema de almacenamiento industrial más económico conocido actualmente, que consiste en un tanque de almacenamiento tipo API.

b) Normativa

Una vez escogido el sistema de almacenamiento, la normativa aplicada en el diseño ha estado determinada por las bajas temperaturas de operación. Para ello ha sido preciso acudir a la Norma "API Standard 620", referente a tanques de almacenamiento de baja presión, a pesar de que las condiciones de presión sean atmosféricas, debido a que la normativa para tanques atmosféricos no contempla el almacenamiento de productos refrigerados. El código "API Standard 620" cuenta además con un Apéndice Q para tanques de almacenamiento de baja presión para hidrocarburos licuados a temperaturas no inferiores a -270° F (-167,8° C), que ha sido aplicado en el cálculo y dimensionamiento, y cuyas disposiciones se han superpuesto a lo establecido en la parte general de la norma.

c) Geometría y capacidad de almacenamiento

Finalmente, las magnitudes geométricas del tanque de almacenamiento han estado determinadas por el volumen de producto almacenado. Para la determinación de la forma geométrica, se ha tomado como punto de partida un volumen aproximado de 32.000 m³ de CO₂, al tratarse de la capacidad media de GNL que se almacena en la actualidad. Así pues, la forma geométrica elegida ha sido un tanque cilíndrico vertical de fondo plano, dado que permite almacenar grandes cantidades volumétricas con un coste bajo.

La determinación de las dimensiones geométricas del tanque interior se ha llevado a cabo en función de un criterio basado en la búsqueda de la relación altura/diámetro, que implica una baja superficie de transferencia de calor expuesta junto con un buen diseño estructural. Las magnitudes geométricas escogidas han sido una altura de la envolvente interior $H_i = 25$ m y un diámetro del tanque interior $D_{c4} = 40$ m. Así pues, la capacidad de la envolvente interior del tanque del almacenamiento es $V_i = 31.416m^3$.

Ahora bien, no toda la envolvente interior contendrá CO₂ en estado sólido, dado que la transferencia de calor desde el exterior provocará la sublimación de parte del CO₂(s)

almacenado. En base a la Norma “*API Standard 620*”, el volumen de CO₂ (g) que se forme como consecuencia del calor transferido desde el exterior no debe ser inferior al 2% de la máxima capacidad de CO₂ (s) almacenado. Se ha considerado pues, que la máxima altura de llenado de la envoltente interior sea 24m, lo que equivale a que el máximo volumen de CO₂ en estado sólido almacenado en la unidad sea $V_{\text{máximo llenado}} = 30.159m^3$. Esto se traduce en más de 47.000t de CO₂ almacenadas en un único tanque.

Así pues, un hecho que evidencia la utilidad de este sistema de almacenamiento es que para albergar los 130Mt que actualmente se aprovechan en la industria global en aplicaciones basadas en la utilización de CO₂, únicamente serían necesarios unos 2.700 tanques de almacenamiento, frente a los más de 260.000 depósitos que se requieren hoy en día (suponiendo que todos los recipientes que se utilizan tuviesen 500t de capacidad máxima).

Además, la eficacia del sistema calorífugo diseñado se pone de manifiesto con el flujo volumétrico de CO₂ (s) que sublima diariamente, de sólo $13,57m^3/día$, lo que equivale a 0,045% del CO₂ (s) almacenado, dado que la máxima capacidad de llenado del tanque interior es de $30.159m^3$.

5.3 Diseño de componentes

El diseño de las componentes que forman parte del tanque de almacenamiento ha implicado realizar un análisis de los distintos tipos y geometrías que existen actualmente, para determinar, en función de las condiciones de almacenamiento, cuál es la mejor opción en cada caso.

El estudio se ha centrado principalmente en considerar las ventajas e inconvenientes de los distintos tipos de cubierta para los tanques cilíndricos verticales de fondo plano, teniendo en cuenta la necesidad del diseño de un sistema calorífugo. Se han analizado techos fijos cónicos autosoportados, cónicos soportados y domo y sombrilla autosoportados, así como techos flotantes cubiertos y externos.

Tras el análisis del diseño de componentes se ha concluido que el tanque de almacenamiento estará constituido por:

- Un doble techo fijo domo autosoportado, dado que la hermeticidad conseguida es alta y permite el empleo de aislamiento entre ambos techos, lo que reduce significativamente la transferencia de calor desde el exterior. Además, al doble techo se le puede implementar una estructura metálica con el propósito de lograr una mejor estabilidad frente a cargas externas.
- Una doble envoltente cilíndrica vertical, en cuyo interior se aloja el aislamiento térmico que mantendrá la temperatura requerida de -80° C dentro del tanque interior.
- Un doble fondo plano, con placas anulares sobre las que descansan ambas envoltentes para reducir posibles fallos en las placas de los fondos originados por la alta densidad del elevado volumen de CO₂ (s) almacenado.

5.4 Materiales

Una vez conocida la geometría del tanque de almacenamiento, así como el tipo de componentes que lo configuran, ha sido preciso determinar los materiales óptimos de construcción. A continuación, se simplifican los criterios seguidos en función de los requerimientos que ha exigido el material en cada caso:

- El tanque exterior estará sometido principalmente a cargas mecánicas, tales como la carga ejercida por el aislamiento térmico ubicado en el espacio entre ambos tanques, cargas externas y cargas impuestas durante su transporte, instalación y desmontaje. Por el contrario, las cargas térmicas serán mínimas, dado que la presión y temperatura a las que estará sometido este material de construcción son las ambientales. Como efectos químicos podrían aparecer problemas de corrosión. Así pues, se ha seleccionado un acero al carbono, concretamente el acero estructural básico ASTM A36.
- El tanque interior de la unidad de almacenamiento tendrá la misión de albergar CO₂ en estado sólido a presión atmosférica y temperatura de -80° C. En base a la Norma UNE EN 13458-1: 2002, este tanque estará sometido a cargas mecánicas como resultado del sólido que debe albergar, así como a cargas generadas durante la prueba de presión y a cargas impuestas durante su transporte, instalación y desmontaje. Sin embargo, las cargas térmicas serán especialmente importantes por el contraste de temperatura entre la cara interior del material de construcción (en contacto con el CO₂ (s) a -80° C) y la cara exterior (en contacto con el aislamiento térmico). En base a la Norma UNE EN 1797: 2002, los efectos químicos serán mínimos dado que los problemas de compatibilidad del gas y el material, tales como corrosión o fragilización por hidrógeno, son despreciables a temperaturas criogénicas. El material seleccionado ha sido por tanto el acero con el mínimo contenido de níquel que cumple con los requisitos establecidos; es decir, el acero 15NiMn6.
- El aislamiento térmico ubicado entre ambos tanques deberá minimizar en gran medida el fenómeno de transferencia de calor que alteraría las condiciones de almacenamiento. El material seleccionado ha sido la perlita expandida, ya que presenta un nivel muy bajo de conductividad térmica y es un aislante muy apto y versátil. Además, presenta muchas ventajas con respecto a otros sistemas, como son: bajo coste, no deforma el recipiente que debe aislar, cumple con las regulaciones de incendio y no se deteriora con el paso del tiempo.

6. Cálculo y dimensionamiento de la unidad de almacenamiento⁸

6.1 Condiciones de análisis

El doble tanque de almacenamiento estará sometido a distintas condiciones de carga a lo largo de su vida de funcionamiento. Todas estas situaciones han sido estudiadas para determinar qué condiciones gobiernan y por consiguiente determinan el cálculo y dimensionamiento de la unidad de almacenamiento.

A continuación se explican en líneas generales las distintas condiciones de carga analizadas.

- Las condiciones de operación se han analizado cuando el tanque interior alberga CO₂ (s) hasta su máxima capacidad de llenado. El espacio libre entre el espejo de sólido y la superficie interior del techo interior estará ocupado por CO₂ en estado gaseoso, como consecuencia del calor transferido desde el exterior, y en el espacio situado entre ambos tanques se encontrará ubicado el aislamiento térmico.
- El “Hydrotest” o test hidrostático es una prueba que permite comprobar si existen fugas en el tanque antes de iniciar su funcionamiento normal. Se llevará a cabo después de que todo el tanque esté construido y antes de que el aislamiento térmico sea aplicado. Se llenará el tanque con agua hasta el nivel de diseño de líquido y se aplicará una presión de aire de 1,25 veces la presión para la cual el espacio de vapor está diseñado. En nuestro caso, se aplicará una presión de aire de 18,75lbf/in², 1,25 veces la máxima presión que puede alcanzar el CO₂ (g) en condiciones de operación, y que la norma fija en 15lbf/in². Esta presión de test se deberá mantener durante una hora.
- Las condiciones “Empty” corresponderán a una situación normal de operación en la que el tanque interior se vacía del CO₂ (s) almacenado, de forma que únicamente quede contenido CO₂ en estado gaseoso. Al tratarse de una situación común que se desarrollará durante la operación normal del tanque de almacenamiento, en el espacio situado entre ambos tanques se encontrará ubicado el aislamiento térmico, que se inyectará antes de la puesta en marcha.
- Las condiciones “Shutdown” se corresponderán igualmente con una situación normal de operación en la que el tanque interior se vaciará únicamente del CO₂ (g) ubicado sobre el espejo de sólido, despresurizando así el tanque interior. El tanque de almacenamiento ya estará provisto del aislamiento térmico, al igual que en las condiciones “Empty”.

⁸ En el presente apartado se explica en líneas muy generales el cálculo y dimensionamiento de la unidad de almacenamiento, dado que por su complejidad y extensión no es posible abordarlo por las limitaciones de esta comunicación técnica. El desarrollo completo del cálculo y dimensionamiento se ha llevado a cabo en el “Capítulo 6. Cálculo y dimensionamiento de la unidad de almacenamiento”. Proyecto Fin de Carrera “Diseño de Unidad de Almacenamiento de CO₂ en estado sólido”. Autora: Cristina Vázquez Hernández.

- Las condiciones “Erection” se corresponderán con una situación normal de operación en la que el tanque interior se vaciará completamente de contenido, generalmente para llevar a cabo operaciones de limpieza y mantenimiento. El tanque de almacenamiento ya estará provisto del aislamiento térmico, al igual que en las condiciones “Empty” y “Shutdown”.

6.2 Procedimiento de cálculo

La Norma “*API Standard 620*” establece un procedimiento de diseño denominado análisis “free-body”, para el análisis de las distintas condiciones de carga. Este método consiste en considerar sucesivos planos horizontales que cortan al tanque en distintos niveles, para determinar la magnitud y dirección de las fuerzas que deben ser ejercidas por el tanque en el nivel seleccionado, y mantener así en equilibrio estático la porción del tanque y su contenido por encima o por debajo de dicho nivel. El análisis “free-body” se ha realizado a niveles sucesivos desde la parte superior a la parte inferior del tanque.

A cada nivel del tanque seleccionado para el análisis “free-body” y para cada condición de carga (operación, “Hydrotest”, “Empty”, “Erection” y “Shutdown”) ha sido necesario determinar la magnitud y dirección de las fuerzas unitarias meridional y latitudinal, T_1 y T_2 , utilizando distintas ecuaciones en función de la geometría de la porción analizada.

Los valores de T_1 y T_2 obtenidos en cada nivel han determinado el espesor del material de la componente del tanque analizada en ese nivel. El método empleado en la determinación del espesor requerido ha sido diferente en función de la dirección de las fuerzas unitarias. El espesor requerido en cada componente del tanque nunca ha sido inferior al valor mínimo que establece la Norma “*API Standard 620*”.

Una vez conocidas las fuerzas unitarias que actúan en cada nivel bajo las distintas condiciones, así como el espesor, ha sido necesario comprobar que el esfuerzo al que se verán sometidos los materiales en tales condiciones no excede al del valor máximo que pueden tolerar. El método empleado en estas medidas ha sido diferente en función de la dirección de las fuerzas unitarias.

6.3 Cálculos adicionales

Además del diseño, cálculo y dimensionamiento de la unidad de almacenamiento, se han llevado a cabo una serie de cálculos adicionales que garantizan su estabilidad y correcto funcionamiento.

Uno de ellos ha sido el del perfil de coronamiento o anillo de compresión, un elemento de suma importancia que resiste las fuerzas compresivas circunferenciales que se originan en la unión entre el techo y la envolvente. Además, soporta el peso del techo, rigidiza la zona superior de la envolvente evitando deformaciones u ovalamientos, y logra un sello entre la envolvente y el techo.

Por otro lado, se han determinado los anillos de refuerzo que evitan deformaciones provocadas por la carga de viento, la cual actúa sobre el tanque en las distintas

condiciones de carga (operación, “Hydrotest”, “Empty”, “Erection” y “Shutdown”), y puede originar un momento de volteo que afecte a la estabilidad del tanque.

Además, el tanque de almacenamiento dispone de una serie de dispositivos destinados a evitar derrames o fugas. Teniendo en cuenta que esta unidad estará localizada a la intemperie, si todos estos sistemas de seguridad fallasen, se produciría una fuga a la atmósfera por la sublimación del CO₂ (s), que no causaría problemas derivados de una mala ventilación. Además, es importante señalar que las ventajas del CO₂ frente a otros compuestos es que no forma mezclas peligrosas con ningún otro elemento, es incombustible de modo que no existe riesgo de fuego o explosión, es estable y no genera productos de descomposición peligrosos.

7. Análisis económico

El análisis económico se ha centrado en los costes de fabricación y de operación.

El coste de fabricación del tanque de almacenamiento se compone de los siguientes conceptos: materiales de fabricación, cordón de soldadura que une los distintos componentes, accesorios y tubuladuras, mano de obra, herramientas y equipos empleados en la fabricación, entre otros. El coste de fabricación calculado es inferior a 8M€, cifra muy económica si se compara con el coste que supondría el almacenamiento del mismo volumen de producto en los depósitos a presión que se comercializan en la actualidad. Además, este coste de fabricación es muy inferior al de los tanques de almacenamiento que actualmente se emplean para el confinamiento de productos licuados, tales como GNL, N₂, etc.

El coste de operación representa el gasto necesario para mantener el tanque en funcionamiento. Únicamente se compone del concepto de energía necesaria para mantener en equilibrio el CO₂ en estado sólido almacenado. Se trata de la potencia y el consumo eléctrico de los dispositivos encargados de extraer el CO₂ (g) producto de la sublimación del CO₂ (s), para convertirlo nuevamente a estado sólido y reinyectarlo en el tanque de almacenamiento. El valor de este concepto es función de las fluctuaciones de temperatura ambiental que provocarán que una mayor o menor cantidad de CO₂ sólido sublime y de las distintas operaciones de carga y descarga que se lleven a cabo. No obstante, el coste de operación estimado es inferior a 200.000€ al año, teniendo en cuenta que la potencia nominal necesaria para mantener el ciclo cerrado de almacenamiento temporal en equilibrio es de aproximadamente 140kW.

8. Conclusiones

El almacenamiento temporal masivo de CO₂ capturado se presenta como una etapa futura que hará posible el desarrollo a gran escala de las tecnologías de utilización de CO₂, como medida complementaria en la mitigación del cambio climático.

Las configuraciones de equipos de almacenamiento temporal presentes actualmente en el mercado evidencian importantes limitaciones, lo que ha conducido al diseño innovador de una unidad de almacenamiento temporal de CO₂ en estado sólido, que opera en ciclo

cerrado, disponible para su aplicación en los tres estados de agregación en las tecnologías de utilización de CO₂.

Este sistema de almacenamiento presenta una serie de ventajas con respecto a las configuraciones de equipos actuales, que lo hacen especialmente atractivo:

- El diseño de una unidad de almacenamiento que alberga CO₂ en estado sólido permite incrementar notablemente la cantidad de producto almacenado. En dicho estado es posible almacenar un 50% más de producto que en estado líquido y un 75.000% más que en estado gaseoso. Si esto se transpone a los 130Mt que actualmente se aprovechan en la industria global, únicamente serían necesarios unos 2.700 tanques de almacenamiento (con las dimensiones del presente diseño), frente a los más de 260.000 recipientes a presión que se requieren hoy en día (suponiendo que todos estos depósitos tuviesen 500t, la mayor capacidad de las instalaciones comerciales actuales). Esto se traduce en múltiples ventajas para las tecnologías de utilización de CO₂ en lo referente tanto al ahorro económico como espacial.
- Este almacenamiento a presión atmosférica permite diseñar la configuración de almacenamiento industrial más económica conocida actualmente, que consiste en un tanque tipo API. El CO₂ en estado sólido puede ser almacenado a presión atmosférica. La igualdad de presiones absolutas entre el exterior y el interior de la unidad de almacenamiento reduce las tensiones de membrana y con ello el espesor de material requerido, disminuyéndose así los costes con respecto a recipientes a presión.
- Estas condiciones de presión y temperatura se traducen en el diseño de un sistema de almacenamiento muy seguro. Con un almacenamiento a presión atmosférica se reducen las cargas mecánicas, minimizándose así deformaciones que podrían afectar a la seguridad de la unidad de almacenamiento y conducir a fugas. Además, a temperaturas criogénicas no existen problemas de compatibilidad entre el CO₂ y el material tales como corrosión o fragilización por H₂, que suelen aparecer a temperatura ambiente.
- El diseño propuesto reduce el escape de CO₂ a la atmósfera, puesto que dispone de dos niveles de confinamiento: el estado sólido y el estado gaseoso. Además de utilizar el cambio de fase como medio para mantener las bajas temperaturas de almacenamiento, el estado gaseoso se utiliza como variable de control del sistema para el reconfinamiento del gas. Cuando la presión del gas alcanza un determinado nivel, se activa el ciclo de compresión que lo transforma nuevamente en estado sólido. Los almacenamientos actuales, tanto en estado gaseoso a alta presión como en estado líquido a alta presión presentan fugas de CO₂ a la atmósfera.
- Un almacenamiento en estado sólido implica una máxima versatilidad de suministro, al permitir un abastecimiento en cualquier fase en la que puede existir este compuesto.

9. Bibliografía

- [1] Proyecto Fin de Carrera “Diseño de Unidad de Almacenamiento de CO₂ en estado sólido”. Autora: Cristina Vázquez Hernández.
- [2] Norma: *API Standard 620 “Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks”*. Edición: 11th. Autor: *American Petroleum Institute*.
- [3] Norma: *API Standard 650 “Welded Steel Tanks for Oil Storage”*. Edición: 10th. Autor: *American Petroleum Institute*.
- [4] Norma: “*ASME 2010 SECTION II, PART D*”. Edición: 2010. Autor: *American Society of Mechanical Engineers*.
- [5] Norma: *ASTM A36/A36M-08 “Standard Specification for Carbon Structural Steel”*. Edición: 2008. Autor: *American Society for Testing Materials*.
- [6] Norma: *UNE EN 1252-2:2001 Punto 4 “Requisitos para los aceros con límite de elasticidad $\leq 460\text{N/mm}^2$ ”*. Edición: 2001. Autor: *Comités Técnicos de Normalización (CTN)*.
- [7] Norma: *UNE EN 1252-2:2002 “Recipientes criogénicos. Materiales. Parte 2: Requisitos de tenacidad a temperaturas comprendidas entre -80° C y -20° C”*. Edición: 2002. Autor: *Comités Técnicos de Normalización (CTN)*.
- [8] Norma: *UNE EN 13458-1: 2002 “Recipientes criogénicos. Recipientes estáticos aislados al vacío. Parte 1: Requisitos fundamentales”*. Edición: 2002. Autor: *Comités Técnicos de Normalización (CTN)*.
- [9] Norma: *UNE EN 1797: 2002 “Recipientes criogénicos. Compatibilidad entre el gas y el material”*. Edición: 2002. Autor: *Comités Técnicos de Normalización (CTN)*.
- [10] Norma: *UNE EN ISO 11114-1:1997 “Botellas para el transporte de gas. Compatibilidad de los materiales de la válvula y la botella con el gas contenido. Parte 1: Materiales metálicos”*. Edición: 1997. Autor: *Comités Técnicos de Normalización (CTN)*.
- [11] Norma: *UNE EN 10028-5:2010 “Productos planos de acero para aplicaciones a presión. Parte 5: Aceros soldables de grano fino laminados termomecánicamente”*. Edición: 2010. Autor: *Comités Técnicos de Normalización (CTN)*.
- [12] Norma: *UNE EN 10028-6:2010 “Productos planos de acero para aplicaciones a presión. Parte 5: Aceros soldables de grano fino, templados y revenidos”*. Edición: 2009. Autor: *Comités Técnicos de Normalización (CTN)*.

[13] Norma: *UNE EN 10028-4:2009 "Productos planos de acero para aplicaciones a presión. Parte 4: Aceros aleados al níquel con propiedades especificadas a bajas temperaturas"*. Edición: 2010. Autor: *Comités Técnicos de Normalización (CTN)*.

[14] Norma: *"IACS 2004 Requirements concerning materials and welding" Punto W1.3: Material and welding for gas tankers. Materials requirements*". Edición: 2004. Autor: *INTERNATIONAL ASSOCIATION OF CLASSIFICATION SOCIETIES*.

[15] Norma: *BS EN 10028-4:2009 "Flat products made of steels for pressure purposes; Part 4: Nickel alloy steels with specified low temperature properties"*. Edición: 2009. Autor: *British Standards Institution (BSI)*.

[16] *"El CO₂ como recurso: De la captura a los usos industriales"*. Editorial: *Fundación Gas Natural*. Edición: 1ª, 2010. Autor: *Lourdes F. Vega*. Lugar: *Barcelona, España*.

[17] Informe: *"LA CAPTACIÓN Y EL ALMACENAMIENTO DE DIÓXIDO DE CARBONO. Resumen para responsables de políticas y Resumen técnico"*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. 2005.

[18] Informe: *"CAMBIO CLIMÁTICO 2007. INFORME DE SÍNTESIS"*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. 2007.

[19] Informe: *"Informe sobre el desarrollo mundial. Panorama General. Desarrollo y Cambio Climático"*. Banco Mundial Washington, DC. 2010.

[20] Informe: *"Transporte de CO₂ por tubería. Redes de distribución-Proyecto COMET (VII PROGRAMA MARCO)"*. ENAGAS. 2010.

[21] *ChemicalLogic Corporation*: www.chemicallogic.com