

Superar los retos de transporte y almacenamiento de CO₂

La medición precisa de la cantidad y la calidad garantiza la eficacia y la practicidad en las aplicaciones y procesos del dióxido de carbono

A medida que nos esforzamos por mejorar la captura de emisiones de CO₂, el siguiente paso en la cadena de valor implica el transporte, que precede tanto al almacenamiento como a la utilización del mismo.

Históricamente, el CO₂ se ha transportado por camión en fase líquida, principalmente para la carbonatación de bebidas en el sector de la alimentación y bebidas. La industria alimentaria y de bebidas es uno de los principales transportistas, pero los volúmenes transportados son bajos y no se necesitan grandes cargamentos. El transporte a gran escala de CO₂ por tuberías en fase densa/supercrítica está ganando adeptos. Hay excepciones notables en algunas regiones, como Norteamérica y Oriente Medio, donde el CO₂ se utiliza para la recuperación mejorada de petróleo (EOR) desde hace más de cinco décadas.

En 2024, el Parlamento Europeo adoptó el reglamento sobre eliminación y cultivo de carbono (CRCF), que creó el primer marco voluntario de eliminación de carbono a escala de la UE. Se están aplicando tecnologías innovadoras para el almacenamiento de CO₂ a largo plazo en formaciones geológicas.

Un reto importante en el transporte de CO₂ por tuberías a gran escala se deriva de la diversidad de las fuentes de CO₂, que pueden contener impurezas en función de su origen. Además, el volumen de CO₂ que hay que transportar plantea retos logísticos, sobre todo en lo que respecta a los riesgos asociados a la explotación de oleoductos cerca de zonas densamente pobladas. Los oleoductos funcionan a alta presión en la fase densa y las posibles fugas son motivo de preocupación, aunque existen enclavamientos de seguridad.

El CO₂ tiene su punto crítico a 30,8 °C (87,4 °F) y 73,7 bar (1068,89 psi). Por encima de esta temperatura y presión, se encuentra en estado supercrítico. Transportar CO₂ en su fase supercrítica facilita procesos de transporte más eficientes gracias a una mayor densidad. En este estado, llenará toda la tubería como un gas, tendrá una densidad más alta parecida a la de un líquido y una viscosidad baja como la de un gas. Será altamente compresible cerca y en el punto crítico, y las propiedades del fluido cambian muy rápidamente.

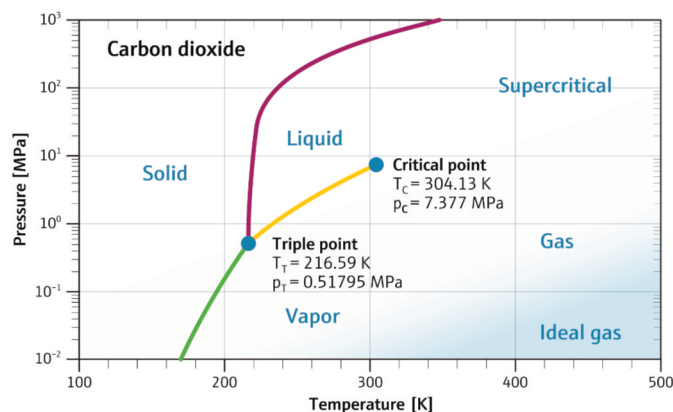


Figure 1: Diferentes fases del dióxido de carbono

Tratamiento de las impurezas en el transporte y almacenamiento de CO₂

Los tipos de impurezas presentes en las corrientes de CO₂ pueden variar significativamente en función de la fuente. Estas impurezas tienen el potencial de reaccionar químicamente entre sí y con su entorno, formando subproductos que pueden afectar negativamente al diseño, a la eficacia operativa y, potencialmente, a la integridad del sistema. Una de las principales preocupaciones es la integridad de los materiales, que puede verse comprometida por la corrosión y el agrietamiento.

La humedad (H₂O) es una impureza notable que puede afectar a la integridad de las tuberías, especialmente a través de la corrosión cuando está presente en concentraciones elevadas debido a la formación de ácido carbónico cuando reacciona con el CO₂. Por consiguiente, es aconsejable restringir la concentración de agua a un máximo de 50 partes por millón (ppm).



Figure 2: J22 TDLAS gas analyzer for moisture measurement

Por lo tanto, la medición precisa y fiable de la humedad en el flujo de CO₂ es de suma importancia. Un sistema de medición probado, como el analizador de gases por espectroscopia de absorción láser de diodo sintonizable (TDLAS) J22, ofrece una solución excelente para mejorar la seguridad y la integridad de las tuberías.

Es esencial tener en cuenta la posibilidad de que se produzcan reacciones químicas entre diversas impurezas del flujo de CO₂, que luego pueden dar lugar a la generación de nuevos compuestos como azufre elemental, ácido sulfúrico (H₂SO₄) y ácido nítrico (HNO₃). La monitorización cuidadosa de otras impurezas -específicamente sulfuro de hidrógeno (H₂S), oxígeno (O₂), metano (CH₄), nitrógeno (N₂), monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂) es imperativa, particularmente cuando se transporta CO₂ de múltiples fuentes.

Hacia el final de la cadena de valor del CO₂, el lugar de inyección y dentro del yacimiento, es fundamental la monitorización de las impurezas del flujo para mitigar posibles problemas como las picaduras y el agrietamiento. Además, la monitorización sirve para prevenir los problemas de almacenamiento geológico relacionados con la capacidad, la inyectividad y la integridad que pueden surgir de una mayor disolución de material atribuida a los óxidos de azufre (SO_x), los óxidos de nitrógeno (NO_x), el sulfuro de hidrógeno (H₂S), los ácidos carboxílicos, el oxígeno (O₂) y el agua (H₂O), así como de la precipitación mineral resultante de estas impurezas.

Existen varias tecnologías de medición para analizar múltiples o determinados tipos de impurezas en el CO₂, pero dado que el negocio de la captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) suele estar orientado a los costes, el bajo coste de propiedad desempeña un papel

clave en el proceso de toma de decisiones tecnológicas. Un aspecto crítico de la monetización del CO₂ está relacionado con dos factores clave: una medición precisa de la cantidad y la calidad, con la asignación y los informes adecuados. Para obtener beneficios económicos a largo plazo, se están adoptando tecnologías basadas en láser, como el TDLAS, como forma preferida de reducir el coste total de propiedad sin comprometer la precisión y fiabilidad de las mediciones.

Medición de la cantidad de dióxido de carbono

los avances recientes han puesto de relieve la necesidad de disponer de técnicas de medición eficientes y de gran precisión para grandes volúmenes, incluso en procesos de CO₂ impuro.

El sector ha acordado el uso de toneladas métricas como unidad de medida normalizada para el CO₂, definidas en millones de toneladas anuales (MTPA) para indicar los caudales. Las cantidades de CO₂ captadas por los proyectos o centros pueden oscilar entre 0,1 MTPA y 20 MTPA.

Los requisitos normativos pueden diferir según las regiones geográficas, lo que introduce un nivel adicional de complejidad en la medición del CO₂ en lo que respecta a la cuantificación, la verificación y la notificación.

Existen diversas tecnologías de medición para la evaluación del CO₂, cada una de las cuales presenta retos y limitaciones específicos en función de la fase, la composición y las condiciones operativas del CO₂. Al seleccionar una tecnología de medición adecuada, es importante considerar si se prefiere la medición de masa directa o indirecta, ya que la conversión de volumen a masa puede requerir dispositivos suplementarios para medir con precisión la presión, la temperatura y la densidad.

Selección de la tecnología adecuada para la captura de CO2 en el transporte

El transporte por tuberías de dióxido de carbono (CO₂) en fase densa/supercrítica está reconocido como el método más rentable para transportar cantidades sustanciales de la manera más eficiente y segura. Este método de transporte es ventajoso por varias razones:

- **Alta densidad:** Permite transportar grandes volúmenes en espacios reducidos
- **Baja viscosidad:** Reduce la fricción, facilitando un flujo más suave a través de las tuberías.
- **Compresión eficaz:** El CO₂ supercrítico puede comprimirse mejor que en estado gaseoso.
- **Corrosión reducida:** Normalmente, el CO₂ supercrítico se deshidrata, lo que reduce significativamente el riesgo de corrosión de las tuberías.
- **Fase estable:** El CO₂ supercrítico mantiene la estabilidad en una amplia gama de temperaturas y presiones, lo que simplifica las operaciones.

El CO₂ en las tuberías de transporte mantiene la fase supercrítica (la temperatura y la presión son superiores al valor crítico), y la presión es aumentada por la unidad de compresión. A diferencia del transporte de gas, el transporte supercrítico necesita establecer la presión mínima para mantener su fase densa.

A pesar de estas ventajas, existen retos relacionados con la medición, entre los que se incluyen:

- Impurezas presentes en la composición del CO₂
- La elección entre la medición directa o indirecta de la masa
- Condiciones de funcionamiento a alta presión
- Requisitos de mantenimiento y calibración

Tecnologías de medición del caudal de CO2 en fase densa/supercrítica

1. Caudalímetro de turbina
2. Caudalímetro cónico
3. Tubo Venturi
4. Caudalímetro ultrasónico
5. Placa de orificio
6. Caudalímetro Coriolis

Sin embargo, el caudalímetro Coriolis se distingue por los siguientes atributos:

- Capacidad de medición directa de la masa
- No es necesario instalar los equipos con tramos rectos aguas arriba o aguas abajo.
- Posibilidad de calibración con fluidos alternativos
- Alta relación de reducción

Existen varios grupos de trabajo del sector en Europa (DNV) y América (API) que trabajan en el establecimiento de nuevas normas para la medición del CO₂, con el consenso de que la tecnología Coriolis ofrece la mejor medición para el CO₂ en fase densa/supercrítica.

CO2 .Sistemas de medición

Los sistemas de medición premontados son una práctica habitual en el sector energético, ya que ofrecen importantes ventajas a la hora de garantizar el diseño adecuado del sistema y la instalación de caudalímetros y analizadores, lo que facilita un rendimiento óptimo de estos instrumentos.

En el contexto del CO₂ denso o supercrítico, que funciona a alta presión, es esencial tener en cuenta factores específicos para garantizar un funcionamiento seguro y eficaz, como:

- Medidores Coriolis de alta presión
- Válvulas dobles de bloqueo y purga en la entrada y la salida de los sistemas de dosificación



Figure 3: Caudalímetro Coriolis Proline Promass O 300

- Boquillas de muestreo aguas arriba del contador
- Contadores de servicio y espera para medir la disponibilidad
- Disposición del contador patrón en "Z" para verificar la calibración
- Redundancia del ordenador de caudal

Cuando se manipula CO₂ a altas presiones, es importante dar prioridad a la seguridad. Esto incluye considerar medidas de seguridad como discos de ruptura y utilizar diagnósticos avanzados en los caudalímetros que puedan proporcionar alertas en caso de cualquier problema potencial de integridad mecánica.

Es esencial reconocer el efecto refrigerante del CO₂ cuando existen diferencias de presión sustanciales dentro del proceso, ya que esto puede provocar tensiones mecánicas en el sistema de tuberías. Por lo tanto, es aconsejable incorporar dispositivos de monitorización de la temperatura redundantes y de respuesta rápida como parte del sistema de medición para identificar y abordar eficazmente el problema.

Table 1: Measurement technologies advantages and disadvantages

Tecnología	Turbina	Cono	Venturi	USM	Placa de orificio	Coriolis
Requisito de densidad para el caudal másico	Si	Si	Si	Si	Si	No
Turndown	10:1	10:1	10:1	100:1	4:1	100:1
Requisitos de instalación aguas arriba / aguas abajo	Si	Si	Si	Si	Si	No
Calibración con fluidos alternativos	Si	Si	Si	No	Si	Si
Costo	Medio	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Alto

Conclusiones

El transporte y almacenamiento de CO₂ desempeñan un papel fundamental en el esfuerzo más amplio por reducir las emisiones de carbono y facilitar la captura, y almacenamiento de carbono (CAC). Aunque el uso de tuberías para transportar CO₂ en su fase densa o supercrítica ofrece importantes ventajas, como mover un mayor volumen a menor coste, sigue habiendo problemas, sobre todo en relación con las impurezas y sus efectos tanto en la integridad de las tuberías como en la precisión de las mediciones.

La presencia de impurezas puede causar la degradación del material y problemas de funcionamiento, por lo que es esencial una monitorización cuidadosa. La selección de tecnologías adecuadas para la medición de la composición, las impurezas y el flujo de CO₂, como los métodos avanzados basados en láser y los caudalímetros Coriolis, debe equilibrar coste, eficiencia, fiabilidad y coste total de propiedad.

Con la creciente demanda en los proyectos de CAC a gran escala, será fundamental abordar estos retos técnicos y económicos para garantizar un transporte y almacenamiento de CO₂ seguro, eficiente y rentable.

La tendencia emergente en el transporte de CO₂ es el cambio hacia el transporte en fase densa, que ofrece una mayor eficiencia en comparación con las fases gaseosa y líquida. Esta evolución concuerda con el rápido crecimiento de la infraestructura de captura y almacenamiento de carbono, tal y como destaca el informe 2024 del Global CCS Institute. Con 50 instalaciones ya operativas, tres de ellas dedicadas al transporte y el almacenamiento, y 44 en construcción (siete centradas en el transporte y el almacenamiento), el sector está creciendo considerablemente. La cartera de proyectos de CCUS se ha ampliado hasta alcanzar los 628 proyectos en julio de 2024, lo que refleja un notable aumento interanual del 60 % y subraya la aceleración del impulso para abordar los objetivos mundiales de descarbonización (Global CCS institute 2024).