

Fluido Supercrítico: La Fusión Perfecta entre Gas y Líquido para la Industria Moderna

En diversas áreas de la ingeniería y sectores afines a la industria podemos encontrar fluidos con características fisicoquímicas únicas, derivadas de las condiciones de presión y temperatura a las que se encuentran. Un caso particular es el fluido supercrítico, cuyas condiciones de operación de presión y temperatura son superiores a su punto crítico termodinámico.

Más allá de lo líquido y lo gaseoso

El punto crítico representa el límite en el cual desaparece la distinción entre las fases líquida y gaseosa en un diagrama de fases. En dicho estado, ambas fases comparten temperatura, presión y volumen específico; es decir, se alcanza una condición en la que las propiedades intensivas de ambas fases, como la densidad, se igualan, haciendo imposible distinguir entre el estado líquido y gaseoso.

Las propiedades del fluido en esta zona pueden asemejarse tanto a las de un gas (alta difusividad másica y baja viscosidad) como a las de un líquido (alta capacidad térmica y elevada densidad). Sin embargo, esta versatilidad viene acompañada de una considerable complejidad, especialmente en la proximidad del punto crítico. En esta región, las propiedades termofísicas se vuelven altamente sensibles a pequeñas variaciones de temperatura y presión. Prácticamente todas las propiedades del fluido cambian de forma no lineal; esto constituye un elemento fundamental para su estudio y aplicación. Para poder observar este fenómeno, a continuación, se muestra un diagrama de presión y temperatura de dióxido de carbono.

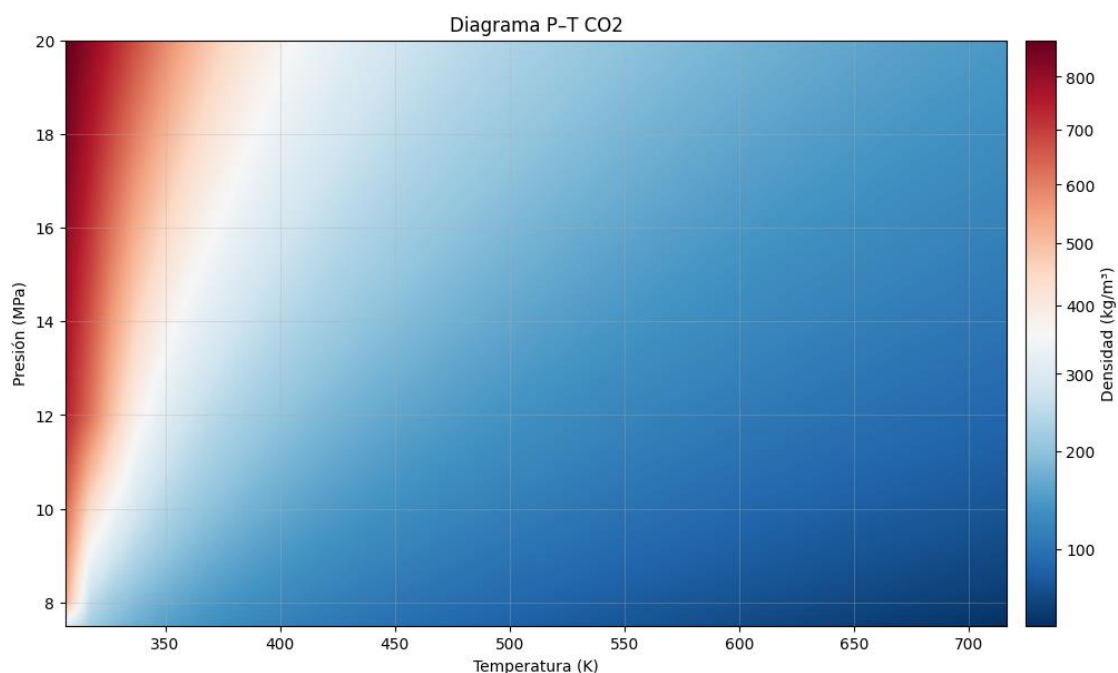


Figura 1. Diagrama Presión-Temperatura del Dióxido de Carbono. Se ha observado que un cambio de tan solo 1 °C puede inducir modificaciones en la densidad de hasta 100 kg/m³.

Propiedades críticas de los fluidos

Cualquier sustancia pura o mezcla conocida puede existir en estado supercrítico bajo las condiciones adecuadas. Entre los ejemplos más comunes se encuentran el amoníaco (NH_3), el metano (CH_4), el etano (C_2H_6) y el propano (C_3H_8). No obstante, la elección del fluido supercrítico debe realizarse en función del objetivo o aplicación específica, ya que las propiedades deseadas pueden ser moduladas mediante dicha selección de un fluido u otro.

En comparación con las fases convencionales (sólida, líquida o gaseosa), los fluidos supercríticos presentan ventajas significativas, tales como densidad ajustable, facilidad de aislamiento y reciclaje del soluto, polaridad modulable y un menor impacto ambiental. La Tabla 1 recopila propiedades críticas de las sustancias utilizadas mayormente en las industrias.

Sustancia	Fórmula	Masa Molar [kg/kmol]	Propiedades de Punto Crítico		
			Temperatura [°C]	Presión [MPa]	Volumen Molar [m ³ /kmol]
Aire	-	28.97	-140.65	3.77	0.0883
Amoníaco	NH ₃	17.03	131.9	11.28	0.0724
Agua	H ₂ O	18.02	373.95	22.06	0.056
Dióxido de Carbono	CO ₂	44.01	31.05	7.39	0.0943
Etano	C ₂ H ₆	30.07	32.35	4.48	0.148
Metano	CH ₄	16.043	-82.05	4.64	0.0993
Nitrógeno	N ₂	28.013	-146.95	3.39	0.0899
Oxígeno	O ₂	31.999	-118.35	5.08	0.078
Propano	C ₃ H ₈	44.097	96.85	4.26	0.1998

Tabla 1. Propiedades críticas de distintas sustancias puras. Aunque podemos reconocer algunas sustancias como fases gaseosas sus propiedades críticas son totalmente diferentes, y por lo tanto sus aplicaciones

Aplicaciones industriales

En la actualidad, y en diversas industrias, el fluido supercrítico más empleado es el dióxido de carbono (CO_2), debido a la facilidad para alcanzar sus condiciones críticas. Tal y como se ha mostrado en estudios: “Supercritical CO_2 is becoming an important commercial and industrial solvent due to its role in chemical extraction in addition to its low toxicity and being environmental friendly solvent” (Cabeza, 2017, p. 800). Otro fluido supercrítico ampliamente utilizado es el agua (H_2O); sin embargo, sus condiciones críticas no se alcanzan con igual facilidad. El agua supercrítica ha extendido su aplicación a procesos de generación de energía en plantas nucleares debido a su elevada conductividad térmica, así como en la mitigación de los efectos de la oxidación en materiales estructurales.

En numerosos productos de consumo cotidiano se han identificado compuestos potencialmente nocivos o tóxicos para la salud humana. Por ello, han sido desarrolladas técnicas de extracción asistida por fluidos supercríticos, mediante las cuales tales sustancias pueden ser eliminadas. El principio de funcionamiento de estas técnicas se basa en dos etapas fundamentales: la extracción propiamente dicha y la posterior separación del extracto con respecto al disolvente.

Casos de uso específicos

Dentro de las aplicaciones actuales se tiene la técnica de fraccionamiento y extracción de lípidos. Los lípidos no deseados son separados y los compuestos bioactivos son concentrados mediante CO_2 en estado supercrítico, utilizado por su capacidad de disolver selectivamente triglicéridos, esteroides y antioxidantes. El proceso es conducido variando presión y temperatura, lo que permite ajustar la afinidad del disolvente según la fracción deseada. Tras la extracción, la despresurización facilita la recuperación del CO_2 sin dejar residuos.

El sector del café lo utiliza para descafeinización. El café verde es sometido a un flujo de CO_2 supercrítico que actúa como disolvente selectivo de la cafeína. Este fluido penetra la matriz del grano y extrae alcaloides sin afectar compuestos responsables del aroma y sabor. La cafeína es luego recuperada por reducción de presión o mediante un absorbente, mientras que el CO_2 es recirculado.

Más aplicaciones relevantes

En la industria tabacalera se permite la desnicotización. El CO_2 supercrítico es aplicado sobre hojas de tabaco para solubilizar nicotina y otras sustancias. El proceso es optimizado mediante codisolventes como etanol, que incrementan la solubilidad de alcaloides polares. Tras la extracción, el CO_2 es separado por expansión, permitiendo su reutilización.

Durante la encapsulación de fármacos con el uso de fluidos supercríticos, los principios activos se disuelven o dispersan junto con los materiales que formarán la cápsula, dentro de un fluido en estado supercrítico, como el dióxido de carbono. Esto permite que el fármaco se incorpore de manera eficiente en un sistema que regula su liberación en el cuerpo, mejorando su estabilidad y efectividad.

Tecnologías emergentes y conclusión

Mediante técnicas como la expansión rápida de soluciones supercríticas (RESS) o la emulsificación, se generan condiciones supercríticas de tamaño controlado. Incluso, ha sido utilizado en el sector petrolero como una técnica mejorada de recuperación del crudo. El CO_2 supercrítico es inyectado en formaciones geológicas para interactuar con el crudo residual. Al disolverse en el petróleo, reduce su viscosidad y causa su expansión, facilitando su desplazamiento hacia los pozos de

producción. El CO_2 también actúa disminuyendo la tensión interfacial entre el petróleo y el agua, incrementando el volumen extraído.

Gracias a las propiedades únicas de los fluidos supercríticos, han podido ser aprovechadas diversas ventajas en múltiples aplicaciones industriales y científicas. Sin lugar a duda, es necesario continuar invirtiendo en el desarrollo y la optimización de estas tecnologías, a fin de maximizar su aprovechamiento y ampliar su potencial en beneficio de la sociedad.

Referencias:

- Cabeza, L. F., de Gracia, A., Fernández, A. I., & Farid, M. M. (2017). Supercritical CO₂ as heat transfer fluid: A review. *Applied Thermal Engineering*, 125, 799–810. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116320646>
- Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM. (s.f.). *Fluidos - Neumática e Hidráulica*. Recuperado el 16 de abril de 2025, de <https://masam.cuautitlan.unam.mx/dycme/neh/fluidos/>
- Gaitán, A., Pernochi Scerbo, M., Comba, L., & Palma, S. D. (2023). Fluidos supercríticos: Innovación y sostenibilidad en la extracción de compuestos naturales. *CONICET Digital*. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/252884/CONICET_Digital_Nro.364f49b5-d0a7-46d9-b5be-63938c88b167_B.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- González, M. A., & Rodríguez, J. L. (2005). Aplicaciones de los fluidos supercríticos en la agroindustria. *Revista de Tecnología Agroindustrial*, 5(2), 45–52. <https://www.redalyc.org/pdf/1210/121014222005.pdf>
- Gupta, R., Mishra, A., & Pathak, A. (2014). Supercritical fluid technology: A boon for pharmaceutical particle manufacturing. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3632.7286>
- LibreTexts Chemistry. (s.f.). 29.01: Properties of Supercritical Fluids. En *Supercritical Fluid Chromatography*. Recuperado el 16 de abril de 2025, de [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Instrumental_Analysis_\(LibreTexts\)/29%3A_Supercritical_Fluid_Chromatography/29.01%3A_Properties_of_Supercritical_Fluids](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Instrumental_Analysis_(LibreTexts)/29%3A_Supercritical_Fluid_Chromatography/29.01%3A_Properties_of_Supercritical_Fluids)
- LibreTexts Español. (s.f.). 29.01: Propiedades de los Fluidos Supercríticos. En *Cromatografía de Fluidos Supercríticos*. Recuperado el 16 de abril de 2025, de [https://espanol.libretexts.org/Quimica/Química_Analítica/Análisis_Instrumental_\(LibreTextos\)/29%3A_Cromatografía_de_Fluidos_Supercríticos/29.01%3A_Propiedades_de_los_Fluidos_Supercríticos](https://espanol.libretexts.org/Quimica/Química_Analítica/Análisis_Instrumental_(LibreTextos)/29%3A_Cromatografía_de_Fluidos_Supercríticos/29.01%3A_Propiedades_de_los_Fluidos_Supercríticos)
- McLaughlin, H., Littlefield, A., Menefee, M., Kinzer, A., Hull, T., Sovacool, B., Bazilian, M., Kim, J., & Griffiths, S. (2023). Carbon capture utilization and storage in review: Sociotechnical implications for a carbon reliant world. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. https://www.researchgate.net/publication/370431105_Carbon_capture_utilization_and_storage_in_review_Sociotechnical_implications_for_a_carbon_reliant_world
- Productos de Instrumentación S.A. (PISA). (s.f.). ¿Qué son los Fluidos Supercríticos? Propiedades y aplicaciones. Recuperado el 16 de abril de 2025, de <https://www.pisa-e.com/que-son-los-fluidos-supercriticos-propiedades-y-aplicaciones/>
- Punto_crítico. (s.f.). https://www.quimica.es/enciclopedia/Punto_cr%C3%ADtico.html

- Scimed. (2024, 16 abril). *What is a Supercritical Fluid?* https://www-scimed-co-uk.translate.google/education/what-is-a-supercritical-fluid/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
- Universidad Complutense de Madrid (UCM). (s.f.). *Extracción mediante CO₂ supercrítico*. Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI). Recuperado el 16 de abril de 2025, de <https://www.ucm.es/otri/complutransfer-extraccion-mediante-co2-supercritico>
- Velasco, R. J., Villada, H. S., & Carrera, J. E. (2007). Aplicaciones de los fluidos supercríticos en la agroindustria. *Información Tecnológica*, 18(1), 53-65. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642007000100009&script=sci_arttext

Sobre los autores:

José Ignacio Muñoz García

Estudiante de Ingeniería Mecánica en la Universidad de las Américas Puebla desde 2022. Egresado de Bachillerato Alemán Abitur y miembro del Programa de Honores.

Contacto: josei.munozga@udlap.mx

Dr. Christian Lagarza Cortés

Doctor en Ingeniería Mecánica (Termo-fluidos) por la UNAM. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Autor de artículos en *Advances and Applications in Fluid Mechanics*, *Computers and Fluids*, *Physics of Fluids*, entre otras. Profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Industrial y Mecánica de la UDLAP desde 2024.

Contacto: christian.lagarza@udlap.mx