

Diseño de una columna de captura de CO₂ y CO con microburbuja para sector ladrillero

Design of a CO₂ y CO capture column with microbubble for brick sector

María Isabel Benavides Torres¹, María Camila Sandoval Tellez², Santiago Gutiérrez Vargas³.

¹ Ingeniería en Bioingeniería, Universidad del Bosque, Colombia.

² Departamento de Ingenierías Química, Electrónica y Biomédica, División de Ciencias en ingeniería, Campus León, Universidad de Guanajuato.
fabiola@ugto.mx

Resumen

El sector ladrillero es uno de los sectores vulnerables del estado de Guanajuato, es un foco de emisiones contaminantes desde la perspectiva ambiental-social, sin embargo, es una materia prima para la industria de la construcción. En este trabajo se realizó una revisión actualizada los Disolventes Eutécticos Profundos (DES) haciendo énfasis en materiales como el cloruro de colina y el glicerol. Se realizó una columna de recirculación y captura de CO₂ y CO con microburbuja a escala laboratorio de 1000 mL. Se realizó un prototipo impreso 3D de tapa universal para el arreglo y acomodo de sensores, para el monitoreo de pH, temperatura luminosidad y CO₂. Se desarrollo una plataforma digital de captura de datos en tiempo real para la adquisición de datos. Finalmente, se vincularon de manera digital las condiciones de operación de un horno MK2 de la ciudad de León Guanajuato a la operación de la columna de captura de CO₂ y CO.

Palabras clave: Horno ladrillero, Horno MK2, Captura de CO₂, microburbuja.

Introducción

El sector ladrillero es uno de los sectores vulnerables del estado de Guanajuato, es un foco de emisiones contaminantes desde la perspectiva ambiental-social, sin embargo, es una materia prima para la industria de la construcción. Beremen-Rodríguez et.al. (2021) describe en su trabajo el impacto del sector en el ambiente y la salud humana, ubicando desde el año 2020, al estado de Guanajuato en la cuarta posición de unidades económicas del sector ladrillero. Del mismo modo, en el mismo trabajo, señala los altos índices de contaminación existentes en la producción de ladrillo rojo.

En este trabajo el objetivo fue realizar una revisión de los Disolventes Eutécticos Profundos (DES) haciendo énfasis en materiales como el cloruro de colina y el glicerol. Se realizó una columna de recirculación y captura de CO₂ y CO con microburbuja a escala laboratorio de 1000 mL. Se realizó un prototipo impreso 3D de tapa universal para el arreglo y acomodo de sensores para el monitoreo de pH, temperatura luminosidad y CO₂.

Metodología

La revisión bibliográfica se realizó empleando las palabras claves Hornos ladrilleros con captura de CO₂, Disolventes Eutécticos Profundos en hornos ladrilleros, Captura de CO₂ con Disolventes Eutécticos Profundos, Columna de microburbuja con gases de combustión; estructurando la revisión bibliográfica actualizada como herramienta de ayuda a lector principiante en el tema de Disolventes Eutécticos Profundos con aplicación en hornos ladrilleros, resolviendo las preguntas: ¿Qué es un Disolvente Eutéctico Profundo?, ¿Cómo se formula un Disolvente Eutéctico Profundo?, ¿Qué aplicaciones actuales ha tenido un Disolvente Eutéctico Profundo?, ¿Qué efecto tiene la temperatura en un Disolvente Eutéctico Profundo?, ¿Cuáles reactores han funcionado en un Disolvente Eutéctico Profundo?.

Se desarrolló el diseño y código de impresión 3D de un molde para lograr modificar vasos precipitados de un litro en reactores herméticos, para poder analizar la absorción de CO_2 en Disolventes Eutécticos Profundos. Del mismo modo, se realizó una plataforma para el monitoreo en tiempo real de pH, Temperatura, luminosidad y CO_2 .

Se monitoreó la cocción de ladrillo rojo, en el parque ladrillero "El Refugio" de la ciudad de León Guanajuato, en un horno MK2 de 12,000 ladrillos de capacidad. Se resalta que este horno presentó un lavador de gases de cascada, el cual permite el uso de fluidos para la captura de gases contaminantes de la cocción de ladrillo rojo.

Resultados

Disolvente Eutéctico Profundo

Los Disolventes Eutécticos Profundos (DES) son mezclas líquidas formadas por un donante de enlace de hidrógeno y un aceptor, que exhiben un punto de fusión más bajo que cualquiera de los componentes individuales. Estos disolventes han ganado atención debido a su capacidad para extraer compuestos de interés, como metabolitos secundarios de materiales vegetales, utilizando una variedad de componentes orgánicos como glucosa, sales cuaternarias de amonio y ácidos orgánicos. Son conocidos por ser ambientalmente amigables, económicos y versátiles en aplicaciones industriales como metalurgia, química analítica, y desarrollo de energía y nanomateriales. (CIAD, 2024).

Uno de los avances recientes en este campo es la obtención Disolventes Eutécticos Profundos mediante la valorización de residuos industriales y su aplicación en la purificación de biogás obtenido en EDARs. El proyecto DES-BIOMETHANE utilizó componentes de residuos industriales para crear disolventes aptos para la captura de CO_2 presente en el biogás producido en las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR). Este proyecto se enfocó en la síntesis de disolventes eutécticos profundos (DES) biodegradables a partir de residuos de la industria del biodiesel, principalmente glicerol, mezclado con una sal cuaternaria de amonio en un ambiente controlado. Tras caracterizar y concentrar el glicerol al 70%, se sintetizó el DES, demostrando una capacidad de captura de CO_2 entre el 15-20%, con posibilidad de aumentar este rendimiento operando a mayores presiones.

Los estudios teóricos mediante Teoría del Funcional de la Densidad (DFT), realizados por López & Trejo (2021), han sido cruciales para entender las propiedades de los Disolventes Eutécticos Profundos (DES). El artículo titulado "Estudio por DFT: ChCl/Urea y ChBr/Urea " evaluó las geometrías de diferentes componentes entre estos Cloruro de colina y Urea. Se creó una Colina y una Urea por separado a los cuales se les realizó su primera optimización usando el método Hartree-Fork (HF). Se realizaron pruebas con iones de Bromuro y Cloruro en diferentes configuraciones y se optimizaron las estructuras para obtener la de menor energía. Posteriormente, se añadieron dos moléculas de Urea a cada DES y se optimizaron nuevamente. Los resultados mostraron que la Colina se curva ligeramente hacia el ion y que la Urea se curva al integrarse en la estructura. Las conclusiones del estudio destacaron que las configuraciones moleculares de ChCl/Urea y ChBr/Urea son viables y sintetizables, con la Urea actuando como neutralizador de carga, lo que aumenta la polarizabilidad.

Por otra parte, el artículo "Disolventes Eutécticos Profundos (DES): Nuevos Disolventes Biorenovables en Catálisis Homogénea Mediada por Metales de Transición" su objetivo principal fue evaluar la actividad catalítica de diferentes complejos bis-alilo de Ru(IV) en procesos de isomerización de alcoholes alílicos utilizando disolventes eutécticos de bajo punto de fusión (DES) como medios de reacción. Estos nuevos disolventes biorenovables mostrarán un gran potencial en catálisis homogénea mediada por metales de transición, destacándose por su capacidad para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los procesos catalíticos, además de ser reutilizables en múltiples ciclos de reacción. Los resultados mostraron que los complejos de Ru(IV) eran muy eficaces para catalizar la isomerización de alcoholes alílicos en los diferentes DES probados. En particular, la mezcla $1\text{ChCl}/2\text{Gly}$ resultó ser muy eficiente, permitiendo que el catalizador se reutilizara varias veces sin perder su actividad. También se demostró que el proceso podía escalar a una mayor escala de producción sin perder eficiencia. (Vidal, 2013)

Con el objetivo de conocer a cerca de otros tipos de DES, Jahanbakhsh & Sardroodi (2023) abordaron en el artículo "Potential of Amine-Based DES for Separation of CO₂ and H₂S from NG: Study of Temperature Effect" se centró en el diseño de disolventes eutécticos profundos (DES) efectivos para los procesos de endulzamiento del gas natural (NG). Específicamente, se investiga cómo los DES basados en N-metildietanolamina (MDEA) absorben los gases ácidos mediante simulaciones de dinámica molecular. Las evaluaciones del perfil de densidad, la función de distribución radial (RDF), el número de enlaces de hidrógeno, las energías de interacción no enlazadas, el desplazamiento cuadrático medio (MSD) y el coeficiente de difusión se realizaron utilizando el programa Visual Molecular Dynamics (VMD). Los resultados mostraron que el DES podía eliminar el 78% de H₂S y el 27% de CO₂ a 320 K. La selectividad de solubilidad y difusividad reveló que el DES tiene una mayor selectividad para H₂S sobre CH₄ a temperaturas más bajas y para CO₂ sobre CH₄ a temperaturas más altas. Además, el DES formó más enlaces de hidrógeno con los gases ácidos, limitando la movilidad de H₂S en comparación con CO₂ y CH₄.

Por último, es importante destacar que existen diferentes propiedades que se deben tener en cuenta para poder realizar un proceso implementando DES. El estudio de los disolventes eutécticos profundos (DES) abarcó una amplia gama de propiedades y aplicaciones, especialmente en la separación de CO₂. En el artículo "Deep Eutectic Solvents: Properties and Applications in CO₂ Separation", se destacan las siguientes características de los DES (Cichowska *et. al* 2023):

1. **Punto de Congelación:** Los DES tienen puntos de congelación muy bajos, influenciados por la naturaleza y proporción de sus componentes. La formación de enlaces de hidrógeno entre el aceptor (HBA) y el donante (HBD) de enlaces de hidrógeno contribuye significativamente a esta reducción.
2. **Presión de Vapor:** Generalmente baja a temperatura ambiente, aumenta con la temperatura. Varía según los componentes del DES, con valores típicos entre 1,33 y 540,9 Pa a 100 °C.
3. **Densidad:** Suele estar entre 1,0 y 1,35 g·cm⁻³ a 25 °C. Varía según la naturaleza de los constituyentes, siendo más densos los que contienen sales metálicas y menos densos los hidrófobos.
4. **Viscosidad:** Varía ampliamente, con valores típicos superiores a 100 mPa·s a temperatura ambiente. Influenciada por la composición, temperatura y presencia de enlaces de hidrógeno, disminuyendo con el aumento de la temperatura.
5. **Tensión Superficial:** Generalmente alta, mostrando una amplia gama de valores entre 23,9 y 75,2 mN·m⁻¹ a 20 °C. Dependiente de la relación molar HBA:HBD y la presencia de grupos funcionales como hidroxilos.
6. **Conductividad Eléctrica:** Por lo general baja (< 1 mS·cm⁻¹ a temperatura ambiente) debido a la alta viscosidad. Aumenta con la temperatura y varía según la naturaleza de la sal y del HBD.
7. **Estabilidad Térmica:** Varía según el HBD y aumenta con la longitud de la cadena alquílica en los HBD. Algunos DES son estables hasta casi 200 °C.
8. **Capacidad Térmica:** Aumenta con la temperatura y está relacionada linealmente con la masa molar de los DES. Modelos predictivos incluyen correlaciones estructurales y redes neuronales artificiales.
9. **Índice de Refracción:** Mayor que el de etanol o acetona, similar al de los líquidos iónicos comunes. Disminuye con el aumento de la temperatura y varía según la relación molar de los componentes.

Molde de impresión 3D

Se desarrolló un diseño en un software de modelado 3D, adaptado específicamente a un contenedor de vidrio con capacidad de 1000 mL. Las piezas fueron ajustadas con tornillos fijadores para proporcionar estabilidad al sistema. Posteriormente, se realizó el ensamblaje de las piezas en el modelado, garantizando una mayor confiabilidad tras la impresión 3D. Finalmente, la tapa fue complementada con sensores para el monitoreo de pH, temperatura, CO₂ y luminosidad, junto con superficies para la inyección de CO₂ y toma de muestra.

Los espesores recomendados desde la base fueron: (1) 20 mm, (2) 30 mm, (3) 30 mm, (4) 70 mm y (5) 70 mm, ver figura 1.

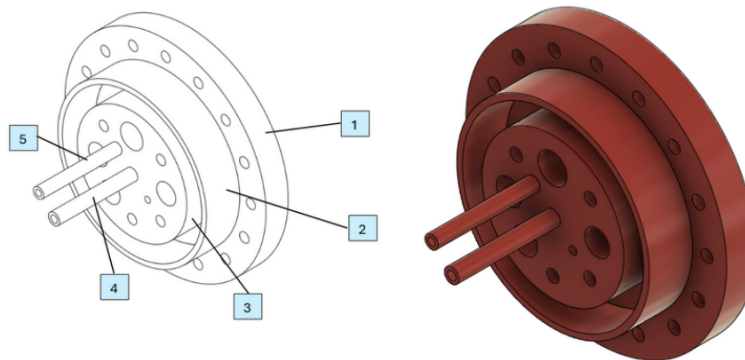


Figura 1. Vista isométrica representativa de prototipo de molde universal.

Durante la etapa de diseño se implementó una interfaz en tiempo real para la adquisición de datos, utilizando el software de programación Proteus y una placa Arduino para la lectura de datos. La interfaz fue diseñada de manera que el usuario pudiera exportar los datos a Excel para su posterior análisis, ver figura 2.



Figura 2. Tablero de monitoreo de la interfaz.

A continuación, se presenta la implementación del prototipo de tapa universal con sensores, incluyendo las dos entradas adicionales para CO₂ y toma de muestra. Al diseñarse a un contenedor de vidrio, se permite llevar a cabo experimentos universales a nivel de laboratorio. La microburbuja, fue explorada por Frey et al (2021), en este proyecto fue desarrollada en un prototipo Venturi impreso en 3D, el cual, con una bomba de agua recircula el fluido para lograr la captura de CO₂ y el tamaño de burbuja micro, ver figura 3.



Figura 3. Prototipos en impresión 3D. (a) Prototipo final de reactor. (b) Prototipo final de microburbuja.

Horno ladrillero

Durante el monitoreo de gases de combustión en el horno ladrillero se observó que, en un periodo de 12 horas, la mezcla de gases alcanza una temperatura mayor a los 100°C. del mismo modo, el agua que es empleada en el lavador de este horno, eleva su temperatura hasta 75 °C, ver figura 4, Tabla 1.



Figura 4. Chimenea de horno ladrillero MK2.

Tabla 1. Monitoreo de temperatura en chimenea de horno ladrillero.

Hora	Temperatura	Hora	Temperatura
15:00	30.0	23:56	52.7
17:49	33.5	1:08	79.8
18:41	53.2	2:411	80.9
20:00	59.7	4:03	87.4
21:00	73.8	5:00	103.8
22:47	35.7	6:00	113.2

Conclusiones

Tras la búsqueda de información realizada y los estudios revisados, se concluye que las mezclas eutécticas (DES) son disolventes sostenibles ambientalmente hablando, dada su baja toxicidad, elevada biodegradabilidad y la escasa huella ecológica de su preparación, dependiendo de los materiales a implementar. Estos hechos han derivado en un creciente interés en los DES como posible medio de reacción alternativo a los disolventes orgánicos tradicionales.

Uno de los desarrollos más prometedores en el campo de los DES es su utilización en la captura de CO₂. Por ejemplo, el proyecto DES-BIOMETHANE ha demostrado la capacidad de los DES, derivados de residuos industriales como el glicerol, para capturar CO₂ con una eficiencia notable. Este enfoque no solo promueve la valorización de residuos industriales, sino que también ofrece una solución sostenible para la gestión de gases de efecto invernadero.

Por otra parte, la selección adecuada de la composición del DES, considerando factores como la presión, temperatura y relación molar es crucial para optimizar su rendimiento en aplicaciones como la captura de CO₂. El diseño y la implementación de reactores adecuados también juegan un papel importante, puesto que son la base para asegurar una operación eficiente bajo condiciones específicas. La integración de tecnologías

avanzadas, como los sensores en línea y los reactores impresos en 3D, puede mejorar la monitorización y el control de los procesos, asegurando una mayor reproducibilidad y eficiencia.

Con el molde desarrollado en impresión 3D, se abrió la puerta para que cualquier vaso precipitado, permita a futuras investigaciones ser un contenedor hermético a un bajo costo de fabricación.

La temperatura de la salida de los gases de combustión de un horno ladrillero, a pesar de que para la cocción de ladrillo rojo se requieran temperaturas mayores de 800°C, no son tan elevadas en su chimenea para este tipo de horno; sin embargo, las correlaciones empíricas sobre los DES y su comportamiento a temperaturas mayores a los 30°C aun no han sido exploradas.

La microburbuja presentó ser una propuesta visionaria para la captura de gases de combustión de hornos ladrilleros, sin embargo, el uso del costo eléctrico aun requiere ser analizado para determinar la factibilidad económica de esta solución ambiental.

Bibliografía/Referencias

- Berumen-Rodríguez, Alejandra Abigail, Pérez-Vázquez, Francisco Javier, Díaz-Barriga, Fernando, Márquez-Mireles, Leonardo Ernesto, & Flores-Ramírez, Rogelio. (2021). Revisión del impacto del sector ladrillero sobre el ambiente y la salud humana en México. *Salud Pública de México*, 63(1), 100-108. Epub 15 de agosto de 2022. <https://doi.org/10.21149/11282>
- Frey, L. J., Vorländer, D., Ostsieker, H., Rasch, D., Lohse, J., Breitfeld, M., Grosch, J., Wehinger, G. D., Bahnmann, J., & Krull, R. (2021). 3D-printed micro bubble column reactor with integrated microsensors for biotechnological applications: From design to evaluation. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86654-9>
- Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD). (2024, 20 junio). Centro de Investigación En Alimentación y Desarrollo (CIAD). <https://www.ciad.mx/mazatlan/>
- López Tenorio, F. ., & Trejo Durán, M. . (2021). Estudio por DFT: ChCl/Urea y ChBr/Urea. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, 10. <https://www.jovenesenenciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenenciencia/article/view/3379>
- C. Vidal (2013). Disolventes eutécticos profundos (DES): Nuevos disolventes biorenovables en catálisis Homogénea mediada por metales de transición. <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/18138>
- Jahanbakhsh-Bonab, P., & Sardroodi, J. J. (2023). Potential of amine-based DES for separation of CO₂ and H₂S from NG: Study of temperature effect. *Journal Of Environmental Chemical Engineering*, 11(5), 110517. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110517>
- Cichowska-Kopczyńska, I., Nowosielski, B., & Warmińska, D. (2023). Deep Eutectic Solvents: Properties and Applications in CO₂ Separation. *Molecules/Molecules Online/Molecules Annual*, 28(14), 5293. <https://doi.org/10.3390/molecules28145293>