

ARTÍCULOS

Una alternativa para mitigar emisiones de CO₂ en centrales termoeléctricas de México

An alternative to mitigate CO₂ emissions in Mexico's thermoelectric power plants

Miriam Navarrete Procopio

ORCID: 0000-0002-0247-9647, miriam.navarrete@uaem.mx

Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería (FCQEI),
Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM)

Luis Fernando Cortés Martínez

CORREO: luis.cortesma@uaem.edu.mx

Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería (FCQEI),
Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM)

Víctor Manuel Zezatti Flores

ORCID: 0000-0001-6470-6772, zezatti@uaem.mx

Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAP),
Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM)

Erick Omar Castañeda Magadán

ORCID: 0000-0002-7003-1860, erick.castanedamag@uaem.edu.mx

Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería (FCQEI),
Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM)

Ángel Tlatelpa Becerro

ORCID: 0000-0002-4891-4405, angel.tlatelpa@uaem.mx

Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla (EESY),
Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM)

Recepción: 20/05/24. Aceptación: 04/04/25. Publicación: 04/07/25.

RESUMEN

No es ningún secreto que en el mundo existen amenazas que pueden acabar con la humanidad por completo: el calentamiento global es una de ellas. El dióxido de carbono (CO₂) es el gas de efecto invernadero que más contribuye a este problema. El proceso de generación de electricidad a partir de combustibles fósiles es la principal fuente de emisiones de CO₂ en México. A continuación se presenta una alternativa tecnológica para mitigar las emisiones de CO₂ provenientes de las centrales termoeléctricas de México con base en los datos reportados en inventarios de emisiones de gases y compuestos e informes anuales sobre centrales eléctricas, así como del registro de fuentes renovables en 2021.

PALABRAS CLAVE

calentamiento global, dióxido de carbono, energía eléctrica, captura de CO₂ poscombustión

ABSTRACT

It is no secret that there are threats in the world that can ultimately end humanity, global warming is one of them. Carbon dioxide (CO₂) is the greenhouse gas that contributes the most to this problem. The process of generating electricity from fossil fuels is the main source of CO₂ emissions in Mexico. The following is a technological alternative for mitigate CO₂ emissions from thermoelectric power plants in Mexico based on data reported in inventories of gas and compound emissions and annual reports on power plants, as well as the registry of renewable sources in the year 2021.

KEYWORDS

global warming, carbon dioxide, electric energy, CO₂ capture, post-combustion

Calentamiento global

El calentamiento global es la retención de calor debido a los gases emitidos por actividades antropogénicas (Holden et al., 2016). A estos gases se les denomina así porque presentan el mismo comportamiento que las paredes de cristal de los invernaderos con la luz solar, es decir, permiten su paso pero retienen el calor. Una parte del calor del sol entra al planeta traspasando las barreras que opone la atmósfera. Luego de cumplir su función, este calor se devuelve a la atmósfera, una parte de su flujo escapa hacia el exterior y la parte restante se dirige nuevamente hacia el planeta.

El efecto invernadero se constituye en una especie de membrana permeable que redirige el calor otra vez hacia la tierra. El cambio climático ocurre como resultado del incremento en las concentraciones de los gases de efecto invernadero, lo que provoca el aumento de la temperatura terrestre y modifica las condiciones de vida en la Tierra (Kumar et al., 2020; Soza y Ayres, 2018).

Emisiones de CO₂

El dióxido de carbono (CO₂) es el gas con mayor impacto, ya que permanece en la atmósfera por muchos años y su concentración está relacionada con la actividad antropogénica (Mander et al., 2016; Sonwani y Saxena, 2022). El 5 de noviembre de 2016 entró en vigor un tratado internacional sobre el cambio climático, el Acuerdo de París, que pretende intensificar acciones e inversiones para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial (Anika et al., 2022).

El Atlas Global del Carbono es una plataforma virtual con base de datos de emisiones de CO₂ en todo el mundo. La figura 1 (p. 3) muestra los países que contribuyen con un total mundial de 37,150 MtCO₂. México forma parte de los veinte países con mayores emisiones de gases de efecto invernadero, al colocarse en el doceavo lugar mundial, con emisiones de 512 MtCO₂.

Emisiones nacionales de CO₂

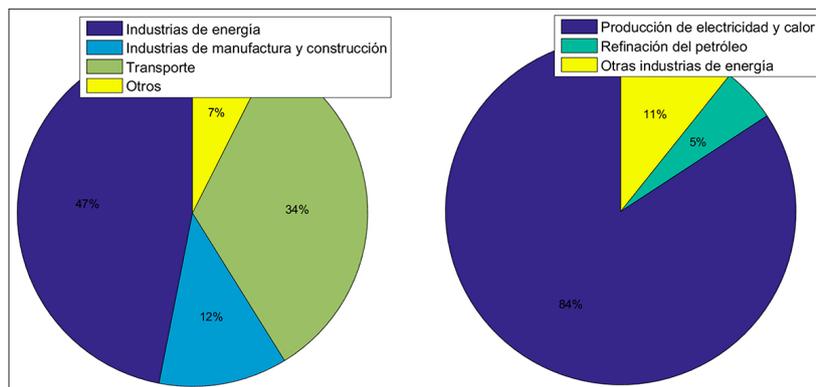
En México, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) es un órgano público descentralizado que realiza el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI). Este inventario categoriza en su base de datos cuatro grandes fuentes emisoras de CO₂ provenientes de la quema de combustible: industrias de la energía, industrias de la manufactura y construcción, transporte y otras industrias. La industria de la energía es la responsable de emitir la mayor cantidad de CO₂ a la atmósfera, con un 47% de las emisiones totales en México. La figura 2 (p. 3) muestra el porcentaje de cada fuente emisora de CO₂ y de las subfuentes pertenecientes a las industrias de la energía, de las cuales la producción de electricidad y calor emite el 84% de CO₂ (171 MtCO₂).

Figura 1
Atlas global de emisiones de carbono



Fuente: Global Carbon Atlas (2022).

Figura 2
Contribución de CO₂ por fuente y subfuente de emisión

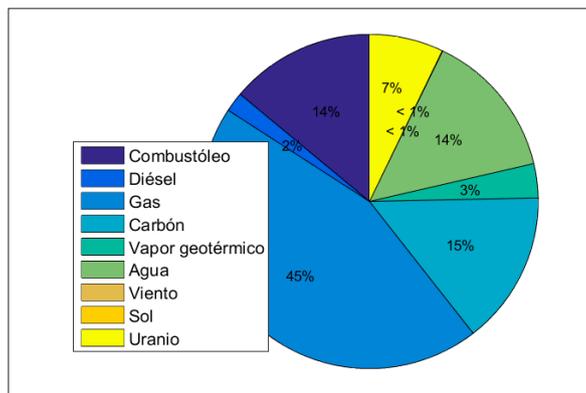


Fuente: elaboración propia con base en INECC (2021).

Producción de energía eléctrica

En México, la producción, el transporte y la distribución de energía eléctrica se realiza a través de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), que en su informe anual de 2021 reportó 195 centrales eléctricas con una capacidad bruta efectiva total de 59,561 MW. La tabla 1 (p. 4) muestra el número de centrales eléctricas renovables y termoeléctricas, así como su capacidad de producción. Del total de la capacidad, un 24.35% correspondía a centrales que

Figura 3
Fuentes primarias para la generación de la electricidad



Fuente: elaboración propia con base en CFE (2021).

Tabla 1
Escenario tecnológico del parque de generación

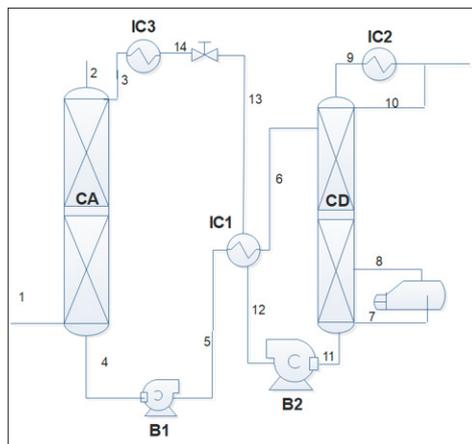
| | Tipo | Número de centrales | Capacidad en MW (bruta efectiva) |
|--|--------------------|---------------------|----------------------------------|
| <i>Centrales eléctricas renovables</i> | Hidroeléctrica | 60 | 12,125.4 |
| | Geotermoeléctrica | 4 | 873.6 |
| | Eoloeléctrica | 9 | 698.6 |
| | Solar fotovoltaica | 2 | 6.0 |
| <i>Centrales termoeléctricas</i> | Vapor | 21 | 10,931.6 |
| | Ciclo combinado | 44 | 23,143.9 |
| | Carboeléctrica | 3 | 5,463.5 |
| | Turbogás | 41 | 2,662.5 |
| | Combustión interna | 5 | 359.0 |

Fuente: elaboración propia con base en CFE (2021).

generan energía con fuentes renovables, como agua, viento, vapor geotérmico, sol y energía nuclear, y el 75.65%, con hidrocarburos.

Las centrales generadoras de la CFE, por la diversidad de tecnologías existentes, utilizan diferentes fuentes primarias para la generación de energía. La figura 3 muestra el porcentaje utilizado por cada fuente, de los cuales el mayor lo ocupa el gas natural, con un 45%. Éste se utiliza en varias centrales termoeléctricas del país, que, a diferencia del combustóleo, el diésel y el carbón, emite CO₂ en menor concentración que el resto de los combustibles fósiles; no obstante, no deja de emitir una gran cantidad de flujo de gas contaminante.

Figura 4
Tecnología poscombustión



Fuente: elaboración propia.

Captura y aprovechamiento de CO₂

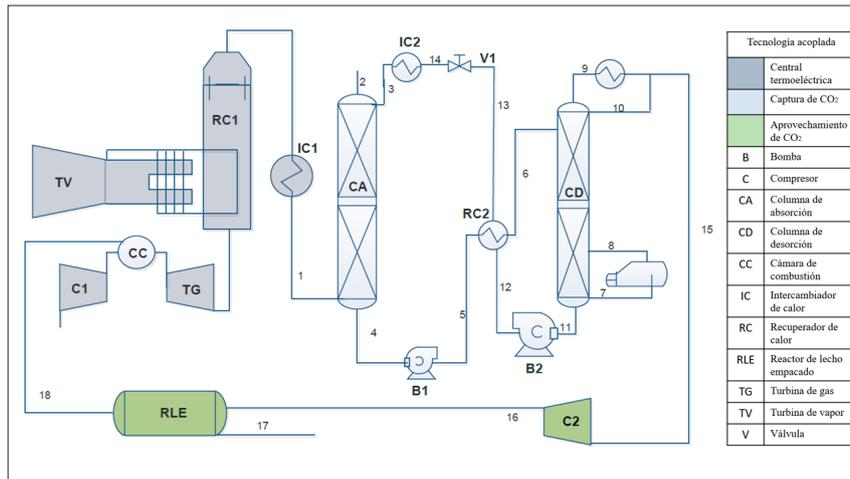
A pesar de que el CO₂ producido por la quema de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica es el gas de efecto invernadero que más contribuye al calentamiento global y al cambio climático, las tecnologías convencionales para la producción de este tipo de energía seguirán operando para abastecer las necesidades del país en este campo. Por lo tanto, es importante desarrollar tecnologías y estrategias para mitigar las emisiones de CO₂ provenientes de estas fuentes (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2021). Las tecnologías actuales para separar el CO₂ de la mezcla de gases provenientes de la quema de combustibles fósiles en las plantas generadoras se clasifican en tecnologías de tratamiento antes de la combustión (precombustión), durante la combustión (oxycombustión) y después de la combustión (poscombustión) (Darabkhani, et al., 2022; Malekli y Aslani, 2022; Mitra et al., 2023).

Tecnología poscombustión de CO₂

La tecnología poscombustión es utilizada para la eliminación de CO₂ proveniente de los gases de combustión en las centrales termoeléctricas. Esta tecnología consiste en la absorción del CO₂ con una solución absorbente de amina (Alalawat y Khan, 2024). Las unidades de proceso principales se muestran en la figura 4, donde aparecen columnas empacadas de absorción y desorción (CA, CD), bombas (B) e intercambiadores de calor (IC) (Wang et al., 2022).

La ventaja distintiva de la captura de CO₂ poscombustión es que puede ser adaptada a las centrales eléctricas existentes sin modificaciones significativas. La principal desventaja de esta tecnología es la alta demanda energética requerida por la regeneración del disolvente (Chao et al., 2021; Raganati y Ammendola, 2024).

Figura 5
Diagrama de proceso para la propuesta tecnológica
de captura y aprovechamiento de CO₂



Fuente: elaboración propia.

Aprovechamiento de CO₂

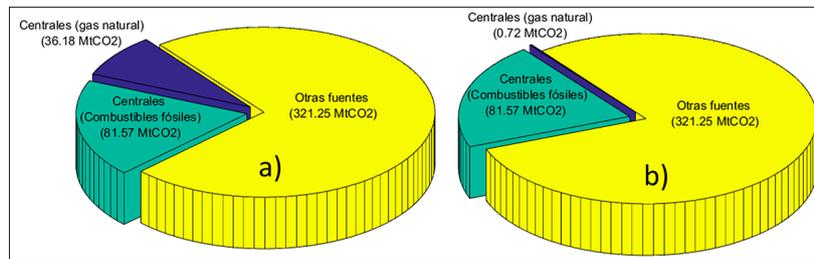
Se realizó una investigación detallada para encontrar una técnica y disponer de la captura del CO₂ en una central termoeléctrica. Se encontró que existen dos alternativas: una que consiste en capturar, transportar y almacenar el CO₂ en el subsuelo y otra que consiste en la captura y el aprovechamiento de CO₂, donde el flujo de gas capturado sería utilizado en la elaboración de otros productos, como combustibles, especialidades químicas y materiales de construcción (Hunt et al., 2010; Koytsoumpa et al., 2018).

La propuesta de este trabajo consiste en aprovechar el CO₂ como reactivo en la producción de gas metano (CH₄), al acoplar al proceso de captura poscombustión un reactor que transforme el CO₂ en CH₄ para utilizarlo como combustible dentro de la central termoeléctrica, al obtener un ciclo para la producción y consumo del CO₂ (Hidalgo y Martín-Marroquín, 2020; Schaaf et al., 2014).

Descripción de la propuesta tecnológica

Para mitigar las emisiones de CO₂ provenientes de la quema de combustibles fósiles en las centrales termoeléctricas de México se propone un proceso continuo de captura y aprovechamiento de CO₂. La figura 5 muestra las unidades de proceso para la tecnología de captura y aprovechamiento de CO₂ acoplada a una central termoeléctrica de ciclo combinado. Los gases emitidos por la central se dirigen a una columna empacada de absorción (corriente 1, CA) para absorber el CO₂ con una solución absorbente (Monoetanolamina al 30% m/m)

Figura 6
Resultados de las emisiones de CO₂ en centrales de gas natural



a) Sin la tecnología; b) con la tecnología de captura
 y aprovechamiento de las emisiones de CO₂.

Fuente: elaboración propia.

(corriente 3, CA). El gas sale de la CA a la atmósfera con una concentración mínima de CO₂ (corriente 2, CA) y la solución absorbente concentrada en CO₂ se bombea hacia la columna de desorción, pasando por un recuperador de calor (B1, RC2, CD).

La solución concentrada en CO₂ se pone en contacto a contracorriente con vapor sobrecalentado en la columna de desorción (CD). El CO₂ que se encuentra en mezcla con el vapor se recupera por condensación, de donde se obtiene el CO₂ para su aprovechamiento en la producción de CH₄ en el reactor de lecho empacado (RLE). El gas metano producido entra a la central termoeléctrica como gas de combustión para cerrar el ciclo con mínimas emisiones de CO₂. En la columna de desorción además se regenera la solución absorbente para ingresar de nuevo al proceso (Corrientes 11-14).

Impacto nacional en las emisiones de CO₂

En México, las centrales termoeléctricas que queman gas natural para la producción de electricidad emiten 36.18 MtCO₂. Con una primera simulación de la propuesta tecnológica se reducen las emisiones de CO₂ en un 98%. Aplicando la tecnología a las centrales termoeléctricas de gas natural disminuirían las emisiones por debajo de un millón de toneladas de CO₂. La figura 6 muestra el resultado de las emisiones de CO₂ en las centrales de ciclo combinado sin la tecnología y con la tecnología de captura y aprovechamiento de las emisiones de CO₂.

Conclusiones

Con la implementación de la propuesta de tecnología se puede observar que este gas de efecto invernadero ya no sólo representará un desecho o un contaminante, sino una materia prima que podrá definir y construir el camino de la energía sostenible en México.

Dentro del panorama ingenieril siempre se busca la rentabilidad en un proceso y esto cuestiona fuertemente las nuevas tecnologías. Además, esta propuesta no representa modificaciones significativas en el diseño de las centrales termoeléctricas.

La cantidad de emisiones de CO₂ que se pueden reducir a través de esta propuesta equivalen al 8% de los nacionales totales.

Referencias

- Alalawat, D. y Khan, E. (2024). Post-combustion carbon capture process modeling, simulation, and assessment of synergistic effect of solvents. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 135(2). <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2024.104145>
- Anika, O. C., Nnabuife, S. G., Bello, A., Okoroafor, E. R., Kuang, B. y Villa, R. (2022). Prospects of low and zero-carbon renewable fuels in 1.5-degree net zero emission actualization by 2050: a critical review. *Carbon Capture Science & Technology*, 5, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2022.100072>
- Chao, C., Deng, Y., Dewil, R., Baeyens, J. y Fan, X. (2021). Post-combustion carbon capture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110490>
- Comisión Federal de Electricidad (2025). Reportes financieros: 2021. CFE. <https://www.cfe.gob.mx/finanzas/reportes-financieros/Pages/estados-financieros.aspx#Tab4WebPartCaptionWPQ1>
- Darabkhani, H. G., Varasteh, H. y Bazooyar, B. (2023). 2–Main technologies in CO₂ capture. En *Carbon capture technologies for gas-turbine-based power plants* (pp. 19-38). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818868-2.00002-3>
- Global Carbon Atlas (2022). *Global Carbon Atlas*. <http://www.globalcarbonatlas.org>
- Hidalgo, D. y Martín-Marroquín, J. M. (2020). Power-to-methane, coupling CO₂ capture with fuel production: an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 132, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110057>
- Holden, W., Nadeau, K. y Porio, E. (2016). Climate change: a conceptual framework. En *Ecological liberation theology. Faith-based approaches to poverty and climate change in the Philippines* (pp. 11-16). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50782-8_3
- Hunt, A. J., Sin, E. H. K., Marriott, R. y Clark, J. H. (2010). Generation, capture, and utilization of industrial carbon dioxide. *ChemSusChem. Chemistry-Sustainability-Energy-Materials*, 3(3), 306-322. <https://doi.org/10.1002/cssc.200900169>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2021). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI). Gobierno de México, sp. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero-inegycei>

- Koytsoumpa, E. I., Bergins, C. y Kakaras, E. (2018). The CO₂ economy: review of CO₂ capture and reuse technologies. *The Journal of Supercritical Fluids*, 132, 3-16. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.07.029>
- Kumar, V., Ranjan, D. y Verma, S. (2021). Global climate change: the loop between cause and impact. En S. Singh, P. Singh, R. Selvasembian y K. K. Srivastava (eds.), *Global Climate Change* (pp. 187-211). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822928-6.00002-2>
- Malekli, M. y Aslani, A. (2022). A novel post-combustion CO₂ capture design integrated with an Organic Rankine Cycle (ORC). *Process Safety and Environmental Protection*, 168, 942-952. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.10.076>
- Mander, Ü., Sohar, K., Tournebize, J. y Pärn, J. (2016). Risk analysis of global warming-induced greenhouse gas emissions from natural sources. *International Journal of Safety and Security Engineering*, 6(2), 181-192. <https://doi.org/10.2495/SAFE-V6-N2-181-192>
- Mitra, P., Masum Ahmed, S. M., Mahnaaz Mahmud, D. y Zeyad, M. (2022). An overview of the progress of CO₂ capture technologies [conferencia]. 11th International Conference on Power Science and Engineering, 142-147. <https://doi.org/10.1109/ICPSE56329.2022.9935495>
- Raganati, F. y Ammendola, P. (2024). CO₂ post-combustion capture: a critical review of current technologies and future directions. *Energy & Fuels*, 38(15), 13858-13905. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c02513>
- Schaaf, T., Grünig, J., Schuster, M. R., Rothenfluh, T. y Orth, A. (2014). Methanation of CO₂-storage of renewable energy in a gas distribution system. *Energy, Sustainability and Society*, 4, 1-14. <https://doi.org/10.1186/s13705-014-0029-1>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (10 de noviembre de 2021). Programa Especial de Cambio Climático 2021-24. *Gobierno de México*, sp. <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/programa-especial-de-cambio-climatico-2021-2024>
- Sonwani, S. y Saxena, P. (eds.) (2022). *Greenhouse gases: sources, sinks and mitigation*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-4482-5>
- Soza, E. y Ayres, K. (2018). Global warming and climate change [conferencia]. *Sciforum*. <https://doi.org/10.3390/MOL2NET-04-05474>
- Wang, R., Ashkanani, H. E., Li, B. y Morsi, B. I. (2022). TEA of a unique two-pathways process for post-combustion CO₂ capture. *Journal of Energy and Power Technology*, 4(4), 1-27. <https://doi.org/10.21926/jept.2204033>