VOLUMEN 45
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO Y EMISIONES DE GASES MEDIANTE CFD APLICADO A UNA LADRILLERA

CFD-Based Study of Thermal Behavior and Gas Emissions in a Brick Manufacturing Facility

Orfelina Haydeé Cabello Meza[1], Edilberto Murrieta Luna[2], Susana Gabriela Salazar Ramírez[3], Gonzalo López Campos[4], Jessica Guadalupe Nieto Escoto[3], Luz Vianey Gonzalez Patlan[5], Andrea González Silva[5].

[1] Escuela de Nivel Medio Superior de Pénjamo, Colegio de Nivel Medio Superior, Universidad de Guanajuato, orfelina.meza@ugto.mx
[2] Universidad Politécnica de Juventino Rosas.
[3] Departamento de Farmacia, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato,
. [4] Departamento de Comunicación y Enlace, Rectoría General, Universidad de Guanajuato.
[5] Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato, Colegio de Nivel Medio Superior, Universidad de Guanajuato.
.

Resumen

Los ladrillos son elementos de construcción modular elaborados a partir de suelos locales, que han desempeñado un papel fundamental en la edificación desde los albores de la civilización humana. En México, los procesos de fabricación del ladrillo rojo se basan en un procedimiento común: 1) obtención del suelo local, 2) mezclado y amasado, 3) moldeado 4) secado y 5) cocción. El proceso de cocción es lento y se requieren temperaturas del orden de 1100 a 1300 K, para lo cual se utilizan diversos materiales combustibles como leña, combustóleo, aceites residuales, chapopote, llantas, gas LP, entre otros. En promedio, el consumo energético en la producción de ladrillos es aproximadamente el 60 % del coste de fabricación, además de emitir gases contaminantes que deterioran el ambiente y la salud humana. En este proyecto de investigación se propone como combustible secundario el PET, el cual tiene un poder calorífico de 43.7 MJ/kg que es equivalente a la energía liberada por un 1 Kg de carbón. Se diseñó en CAD el modelo de un horno con capacidad para cocer 15 000 ladrillos. Se realizaron simulaciones numéricas de la combustión de PET en el modelo diseñado, obteniendo temperaturas en la flama de hasta 2100 K y temperaturas promediadas en el horno de 1350 K. Los gases emitidos al ambiente principalmente son dióxido de carbono y agua. Las simulaciones se realizaron en estado transiente y se utilizó el modelo de no mezclado para el transporte de masa, obteniendo resultados favorables.

Palabras clave: CFD; ladrillera; PET, combustión.

Introducción

El ladrillo ha sido el material de construcción más común desde el 4500 a. C., cuando los romanos lo utilizaron por primera vez (Dubale y col., 2024). Hasta la fecha, la industria ladrillera sigue dependiendo en gran medida de los combustibles fósiles, como el carbón, la leña y el diésel. Esto genera importantes problemas ambientales debido a la emisión de gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos, como el dióxido de carbono (CO_2), el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SOx) y las partículas finas ($PM_{2.5}$) (Edo y col., 2024). La combustión incompleta en los hornos a cielo abierto suele dar lugar a una baja eficiencia energética y a elevadas emisiones de subproductos tóxicos (Martínez-González y Jiménez-Islas, 2014). Estas emisiones contribuyen al calentamiento global, degradan la calidad del aire local y contribuyen a graves problemas de salud respiratoria y cardiovascular en las comunidades cercanas (Dahham et al., 2022).

En México se encuentran registradas aproximadamente 17,000 ladrilleras artesanales (DENUE). En el estado de Guanajuato para el año 2022 se habían censado 2184 ladrilleras en las cuales el 99 % de las ladrilleras operan sin regulación ambiental (Periódico Oficial, octubre 2022). Esto genera problemas ambientales debido a que las ladrilleras se encuentran ubicadas en sitios no compatibles para el desarrollo de esta actividad. Aunado a esto, las prácticas rudimentarias para la producción, y el uso intensivo de recursos naturales, derivan en impactos al medio ambiente. El proceso de cocción del ladrillo requiere temperaturas de hasta

1200 K, lo que representa un 60 % del coste de producción del ladrillo (Mireles 2021). Para producir 1 kg de ladrillo se requieren 2 kWh de energía y se liberan 0.41 kg de CO_2 (Dubale y col., 2024).

El consumo anual de plásticos en México es de 66 Kg por persona al año, lo que equivale a más de 6 millones de toneladas y se tiene una cobertura de recolección del 83 %, donde los residuos son quemados a cielo abierto (Albores-González y col., 2023). La presencia de grandes cantidades de residuos plásticos y su baja biodegradabilidad afectan negativamente al medio ambiente (Alabi-Babalola 2026). Todos los tipos de plástico utilizados en la vida cotidiana acaban convirtiéndose en residuos (Namjoufar y col., 2026). Actualmente el plástico posconsumo puede ser tratado por tres métodos principales: relleno sanitario, reciclaje e incineración. La incineración se considera ampliamente el método definitivo para eliminar los residuos plásticos (Yang y col., 2021). La incineración de residuos plásticos tiene la ventaja de la recuperación de energía, lo que minimiza el volumen de residuos sólidos y genera energía en forma de calor, electricidad y combustible, que puede ser utilizada en industrias como la cementera, siderúrgica y ladrillera (Rajasekhar y col. 2015). Este método reduce el volumen de residuos entre un 80 % y un 90 %, por lo tanto, debe considerarse como un medio para reducir la cantidad de residuos que se depositan en rellenos sanitarios (Pham y col., 2015). La combustión completa de los residuos plásticos se presenta a una temperatura superior a los 1100 K, lo que garantiza la disminución de emisiones y produce hasta 46.5 MJ/kg de calor (Nagy y Kuty, 2016) que pueden ser aprovechados para la cocción de ladrillos en hornos artesanales.

El objetivo principal de este trabajo de investigación es analizar por medio de Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) el proceso de combustión de plásticos aplicado a hornos ladrilleros a cielo abierto, como alternativa de mejora en la eficiencia térmica e incrementar la productividad. El análisis numérico permite abordar aspectos que no pueden ser caracterizados fácilmente de forma experimental. Además, las herramientas de CFD pueden reducir los costos de diseño y optimizar la combustión del tereftalato de polietileno (PET). La transferencia de calor, el flujo de fluidos y las reacciones químicas presentes en la oxidación del PET se pueden resolver utilizando CFD.

Fabricación de ladrillo artesanal

La fabricación de ladrillos se lleva a cabo en varias etapas, desde la concentración de materiales (extracción de la tierra, arcilla, recolección de estiércol o aserrín y agua), mezcla homogénea de los mismos, moldeado del ladrillo, secado, cocción, almacenamiento y transporte. El diagrama de la Figura 1 muestra el proceso de fabricación de ladrillos de forma artesanal.



Figura 1. Diagrama del proceso de Fabricación de ladrillo.

La producción de un ladrillo de 0.06 m de alto, 0.14 m de ancho y 0.2 m de largo requiere una aproximado de 3.5 kg de tierra, 0.245 kg de estiércol y 1.650 L de agua. El secado al aire libre puede durar hasta 30 días, después de los cuales, el ladrillo se acomoda en el horno para después ser cocido.

Una de las etapas fundamentales del proceso de fabricación del ladrillo es la cocción, etapa durante la cual se utilizan diversos materiales combustibles que abastecen el calor suficiente para obtener la temperatura de vitrificación. La etapa de cocción del ladrillo se puede dividir en etapas, las cuales inician en la evaporación del agua a 390 K y finalizan a la temperatura de vitrificación cuando el horno supera los 1070 K. En la etapa 4 se forman los óxidos de carbono y los SOx. Las etapas de cocción del ladrillo en horno a cielo abierto se muestran en el diagrama de la Figura 2.

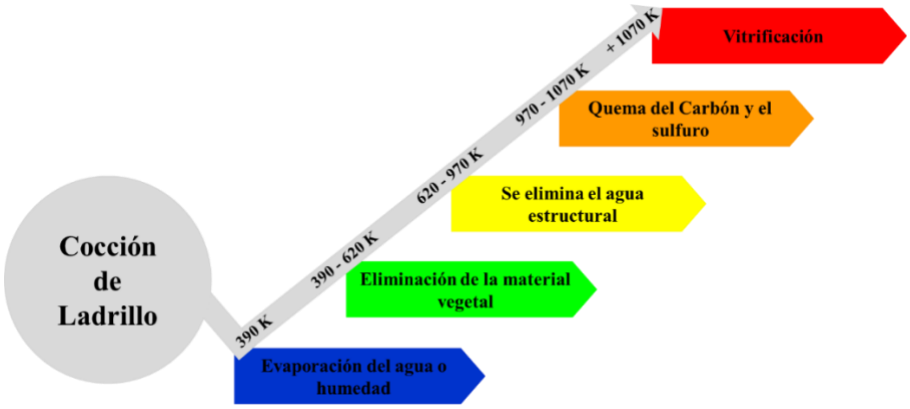


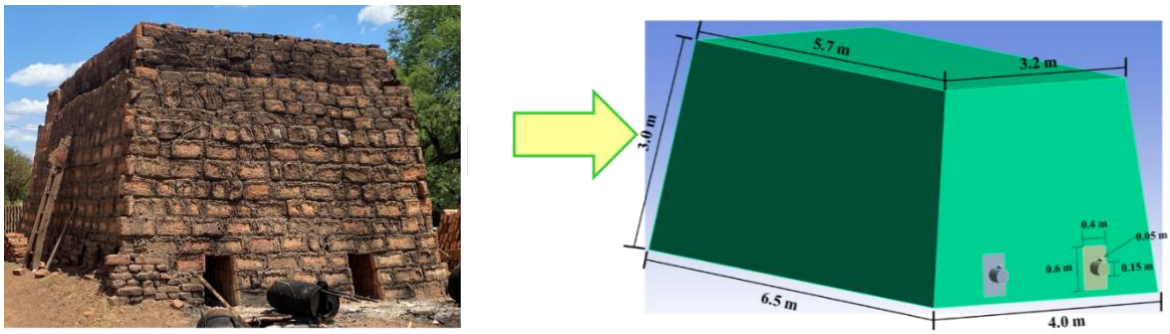
Figura 2. Diagrama de cocción del ladrillo en horno a cielo abierto.

Un horno a cielo abierto con capacidad de cocción de 15,000 ladrillos, en la etapa de cocción dura un aproximado de 15 horas en las cuales se genera la combustión con aceite quemado obtenido de talleres mecánicos y se gasta un aproximado de 3 toneles (600 L). Para evitar un cambio brusco de temperatura, se le adicionan troncos de leña y se sella la entrada del horno.

Metodología

Modelo geométrico

Se realizó el diseño de un modelo en CAD de un horno de cocción de ladrillo con las medidas de un horno real (Figura 3a) el cual tiene la capacidad de cocción de 15,000 ladrillos. El horno mide de frente 4 m, de lado 6.5 y de altura 3 m. Las entradas para las llamas generadas por los quemadores, están a 0.9 m de las orillas y tienen un ancho de 0.4 m y 0.6 m de alto. El quemador tiene un diámetro de 0.15 m y por el centro se alimenta gas por un orificio de 0.025 m de diámetro. El modelo además propone que al quemador se le adiciones una entrada de 0.05 m de diámetro y por la cual se alimentará PET molido como un combustible secundario. El horno diseñado en CAD se puede apreciar en la Figura 3b.



a b

Figura 3. Horno de cocción de ladrillo. a) horno real y b) horno diseñado en CAD.

El modelo en CAD mallado se puede apreciar en la Figura 4. Se obtuvieron 88,870 nodos y 137,466 volúmenes de control. La malla generada es del tipo híbrida ya que el horno tiene una geometría compleja y este tipo de malla es la que mejor se adapta al modelo.

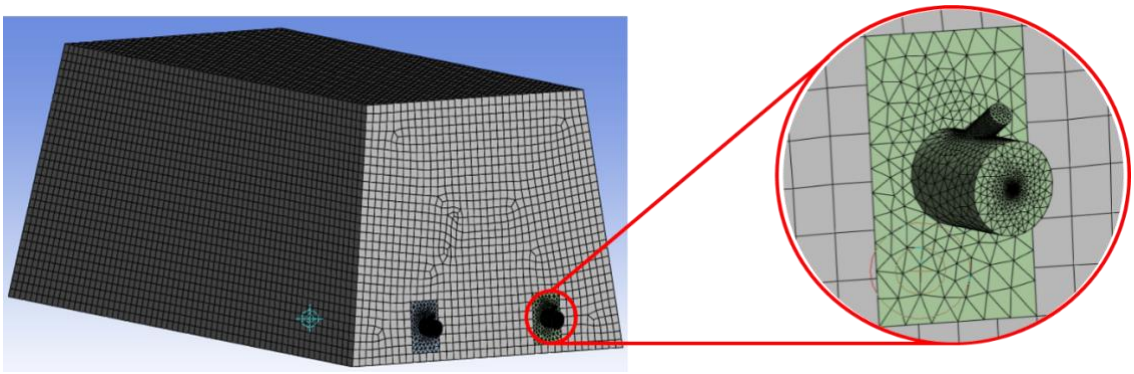


Figura 4. Modelo del horno de cocción de ladrillo mallado.

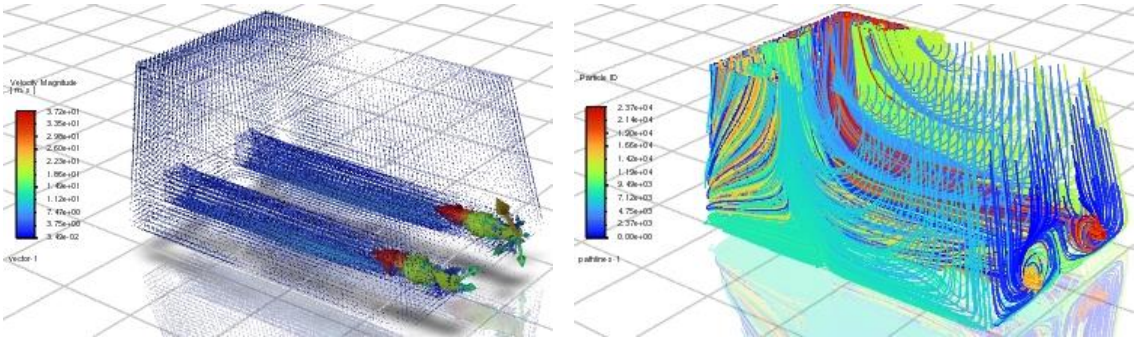
Se le realizó un acercamiento a la entrada del quemador, para poder apreciar los detalles de la adaptación del quemador y la entrada del PET molido. En las partes cilíndricas los elementos de la malla son tetraédricos, pues se adapta de forma adecuada a la forma del quemador, además de que el orificio de alimentación del gas es muy pequeño en relación a al orificio de alimentación del aire.

Las paredes del horno son consideradas como adiabáticas y a temperatura ambiente (298 K), las entradas de alimentación de los combustibles y comburentes se consideran con la condición de frontera de velocidad. La alimentación del aire fue a velocidad de 20 m/s a 600 K, el metano se alimenta a 0.2 m/s a 298 K y el PET es arrastrado por una corriente de aire precalentada a 600 K y 0.5 m/s de velocidad. La salida de los gases de combustión es por la parte superior del horno. La simulación se realizó en estado transitorio para 500 iteraciones.

Resultados

Hidrodinámica

Los vectores de velocidad permiten visualizar la dirección, magnitud y sentido del flujo de un fluido en un dominio. En la Figura 5a se muestran los vectores de velocidad, en los cuales se puede apreciar que la distribución de velocidades dentro del horno ladrillero son homogéneas, lo cual se debe a que los ladrillos al ser acomodados dejan huecos pequeños por donde pasa el flujo de gases. La velocidad máxima registrada en el horno fue de 1.5 m/s. En los quemadores se registra la máxima velocidad con un valor de 4.47 m/s (vectores de color rojo).



a *b*

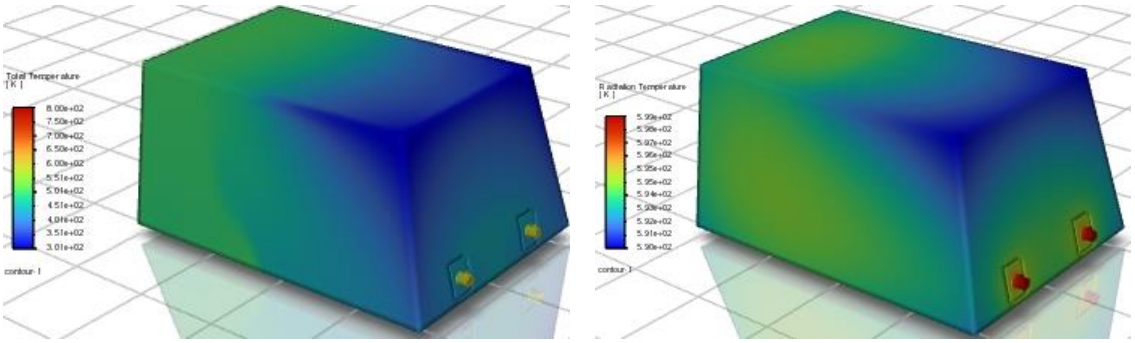
Figura 5. a) Vectores de velocidad y b) líneas de corriente en el horno ladrillero.

La Figura 5b muestra las líneas de corriente, donde se aprecia que el flujo tiene una distribución homogénea en dirección hacia la parte superior (salida de gases). El movimiento es casi rectilíneo, esto debido a que los

huecos formados por los ladrillos son muy pequeños. La flama generada por el quemador choca con la parte posterior del horno, se regresa y choca con la flama, lo que provoca que las líneas de corriente presenten perturbaciones durante el inicio de su ascenso.

Análisis térmico

La distribución de temperatura en el horno ladrillero no es uniforme, pues el calentamiento incrementa de forma más rápida en la parte posterior del horno, esto sucede debido a que el fujo es mayor, porque la flama llega hasta la parte posterior y ya no tiene salida, lo que genera que los gases calientes se dirijan hacia la parte superior del horno (Figura 6a). Los contornos de temperatura muestran que en la parte posterior del horno la temperatura máxima alcanzada fue de 900 K, mientras que en la parte frontal superior tiene una temperatura de 350 K. La temperatura promedidada del horno ladrillero es de 500 K. En el seno de la flama la temperatura máxima alcanzada es de 1450 K. En la salida del horno los gases promedian una temperatura de 440 K.



a *b*

Figura 6. a) contornos de temperatura y b) contornos de temperatura de radiación en el horno ladrillero.

Al calentarse el horno se presenta el fenómeno de radiación, el cual se convierte finalmente en el principal mecanismo de transferencia de calor en el horno ladrillero. Este fenómeno genera una temperatura promediada dentro del horno de 595 K. La mayor radiación se presenta en los huecos del horno que están en contacto con la flama, esto se puede apreciar en la Figura 6b.

Gases de combustión

Los gases de combustión son los subproductos gaseosos que se generan al quemar combustible en hornos ladrilleros. Tienen un impacto negativo en el medio ambiente ya que contiene contaminantes nocivos que reducen la calidad del aire.

En el horno ladrillero se midieron los gases de combustión, donde los productos principales fueron el dióxido de carbono y agua. La Figura 7 muestra el gráfico de fracción masa contra temperatura. se puede observar que al iniciar la alimentación de los gases de combustión se genera la flama, generando CO_2 y H_2O hasta alcanzar una concentración máxima promediada de 3.1 X 10^{-5} para el dióxido de carbono y de 2.61 X 10^{-5} para el agua. El gráfico muestra que después de los 650 K la generación de estos gases es casi constante, lo que significa que la combustión se ha estabilizado.

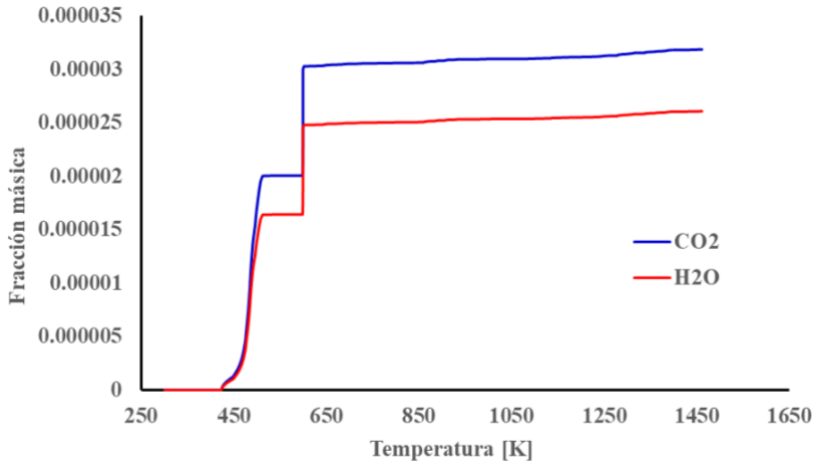


Figura 7. Gráfico de fracción másica contra temperatura [K].

Además de dióxido de carbono y agua, se generan más gases como resultado de la reacción de combustión del PET. Cuando se produce una reacción de combustión incompleta se pueden generar muchos gases de combustión. El gráfico presentado en la Figura 8, muestra las curvas de fracción másica promediada en el horno ladrillero contra temperatura. Los gases monitoreados son el monóxido de carbono (CO), acetona (C_6H_6), butano (C_4H_{10}) y etileno (C_2H_4). La acetona formada por la reacción de combustión presentó una concentración máxima de 1.2 X 10^{-9} y es representado por la línea de color azul, mientras que el butano presentó una medición máxima en fracción másica de 4.6 X 10^{-10} y en el gráfico se representa por la línea de color rosa. De la misma manera se midieron las concentraciones másicas de monóxido de carbono y del etileno, las cuales tiene un comportamiento similar, pues presentaron fracciones másicas máximas de 1.32 X10^{-10} para monóxido de carbono y de 1.1 X 10^{-10} para el etileno. Estas concentraciones son muy bajas, por lo que no representan peligro para la salud, por lo que se puede considerar que las condiciones de operación fueron adecuadas y se tuvo una reacción de combustión favorable.

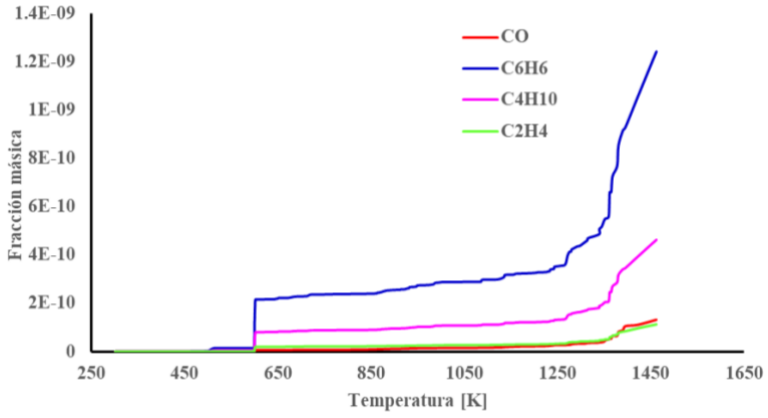


Figura 8. Gráfico de fracción másica contra temperatura [K].

Conclusiones

Comprender y controlar la composición de los gases de combustión es fundamental para optimizar el rendimiento, garantizar la seguridad y cumplir con las normas ambientales. El análisis por métodos numéricos ofrece soluciones avanzadas que se pueden adaptar a los desafíos específicos del análisis de gases de combustión. Los análisis por CFD proporcionan mediciones que se pueden utilizar para mejorar la eficiencia de la combustión, reducir las emisiones y proteger sus equipos.

En este trabajo de investigación se realizó el análisis a un horno ladrillero, el cual opera con gas y se le implementó como combustible secundario el PET. El modelo utilizado para modelar la turbulencia fue el k-épsilon y presentó buenos resultados. Las simulaciones se llevaron acabo en estado transitorio para 500 iteraciones con un espacio de tiempo de 0.1 s.

La temperatura máxima alcanzada fue de 1400 K y se sabe que un horno ladrillero alcanza una temperatura máxima 1100 K, por lo que la combinación de estos dos combustibles es factible para este propósito. Se determinó que la calentarse el horno, el principal mecanismo de transferencia de calor es la radiación. El CO_2 y el H_2O fueron los gases con mayor presencia en la medición de los gases de combustión, lo que significa que se tuvo una combustión favorable.

Bibliografía/Referencias

Alabi-Babalola, O., 2026. Polymer and plastic waste recycling: Challenges and prospects towards a circular economy. Chemical Engineering Journal Advances. 1011777.

Albores-González, M. L., Jiménez-Reyes, A., Cimadevilla-Cervera, A., & Tena-Gutierrez, F., 2023, National Inventory of Sources of Plastic Pollution (INFCP). At http://www.gob.mx/semarnat. MINISTRY OF ENVIRONMENT AND NATURAL RESOURCES. Retrieved March 4, 2025, from https://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/portal/publicaciones/2023/NFCP_2023.pdf.

Bahena-Martínez, F. N., Corral-Avitia, A. Y., Juárez-López, A. L., Rosas-Acevedo, J. L., Reyes-Umaña, M., & Bedolla-Solano, R. (2020). Estudio socioambiental del sector ladrillero artesanal en el municipio de Coyuca de Benítez, Guerrero. Ciencia en la frontera: revista de ciencia y tecnología de la UACJ, 7-19

Dahham,R.Y., Wei,H., Pan, J., 2022. Improving thermal efficiency of internal combustion engines: recent progress and remaining challenges. Energies, Vol. 15, p. 6222

Dubale, M., Vasić, M.V., Goel, G., Kalamdhad, A., Laishram, A. (2024). The recycling of demolition roof tile waste as a resource in the manufacturing of fired bricks: A scale-up to the industry. Construction and Building Materials. Vol. 412 (19), 134727. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134727

Edo, G.I., Itoje-akpokiniovo, L.O., Obasohan, P., Ikpekoro, V.O., Oghenekeno-Samuel, Ngukuran-Jikah, A., Chikodiri-Nosu. L., Avuokerie-Ekokotu, H., Ufuoma Ugbune, Oghroro, E.E.E., Lucky-Emakpor, O., Ebosereme-Ainyanbhor, I., Mohammed, W.A.S., Othuke-Akpoghelie, P., Oghenewogaga-Owheruo, J., Agbo, J.J., (2024). Impact of environmental pollution from human activities on water, air quality and climate change. Ecological Frontiers. Vol. 44 (5), pp. 874-889. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecofro.2024.02.014.

Gobierno del Estado de Guanajuato. (2022). Acuerdo Gubernativo Número 306: Se constituye la Comisión Mixta para la atención del sector Ladrillero en el estado de Guanajuato. Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Guanajuato. Disponible: https://portalsocial.guanajuato.gob.mx/sites/default/files/documentos/2022_GOBIERNO_GTO_Acuerdo_comision_mixta_atencion_sector_ladrillero_estado_guanajuato_constitutye_20221019.pdf. Consultado: 09/04/2026. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Directorio Nacional de Unidades Económicas. México: INEGI, 2026. https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/ Consultado: 09/04/2026.

Ju, S., Chung, S. Park, S.B., Koo, J.M. Shin, G., Jeon, H., Park, J., Oh, D.X., 2026. Reframing Biodegradable Plastic as an Effective, Chemically Recyclable Resource for a Circular Economy. Engineering. Vol.58, pp. 48-63. Martínez-González, G.M., & Jiménez-Islas, H. (2014). Experimental study of the firing of red clay bricks using liquefied petroleum gas. In Journal of Scientific & Industrial Research, Vol. 73, pp. 661-666.

Pham, T.P.T., Kaushik, R., Parshetti, G.K., Mahmood, R., Balasubramanian.R. 2015. Food waste-to-energy conversion technologies: Current status and future directions. Waste Management. Vol. 38, pp. 399-408.

Mireles-Lara, J.A. 2021. Mejora del proceso de cocción de ladrillo artesanal en horno tipo MK2 por simulación numérica. Tesis de Doctorado. CIATEC

Nagy, A., Kuti, R. (2016). The Environmental Impact of Plastic Waste Incineration. Academic and Applied Research in Military and Public Management Science. Vol. 15 (3), pp. 231-237.

Namjoufar, m., Wei, Y., Maloney, K.J.R., Laghaei, M., Patadiya, J., Hadigheh, S.A., Naebe, M., Zabihi, O., 2026. Overcoming technical barriers in mechanical recycling of plastic waste: The role of engineered additives. Journal of Environmental Chemical. Vol. 14 (2), pp. 121229.

Rajasekhar, M., Venkat-Rao, N., Chinna-Rao, G., Priyadarshini, G., Jeevan-Kumar, N. 2015. Energy Generation from Municipal Solid Waste by Innovative Technologies – Plasma Gasification. Procedia Materials Science. Vol. 10, pp. 513-518.

Yang, Z., Lü, F., Zhang, H., Wang, W., Shao, L., Ye, J., He, P., 2021. Is incineration the terminator of plastics and microplastics? Journal of Hazardous Materials. Vol. 401, pp. 123429.