

## ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA COMBUSTIÓN DE POLVO DE PP MEDIANTE EL USO DE CFD

Laura Luz Romero Martínez <sup>a</sup>, Edilberto Murrieta Luna <sup>a,\*</sup>, Beatriz Eugenia Rubio Campos <sup>b</sup>, Maria del Carmen Cisneros Rivas <sup>a</sup>, Mario Alberto Rodríguez Angeles <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Universidad Politécnica de Juventino Rosas, Departamento de Ingeniería en Plásticos, Santa Cruz de Juventino Rosas, Gto., C.P. 38400, México. [emurrieta@upjr.edu.mx](mailto:emurrieta@upjr.edu.mx)

<sup>b</sup> Escuela Nivel Medio Superior de Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Alameda s/n, Guanajuato, Gto., 36000, México.

### Resumen

El polipropileno (PP) es una de las resinas termoplásticas con mayor volumen de producción (16 % del mercado mundial de plásticos), esto debido a sus propiedades como resistencia a la corrosión, buena maleabilidad, alta resistencia a la tracción y baja densidad. Sin embargo, constituye una fuente de residuos sólidos importante y su recuperación no siempre es económicamente viable, por lo que, generalmente su eliminación se realiza mediante combustión en incineradores u hornos. Se ha reportado que el PP tiene un poder calorífico de 46 MJ/kg, equivalente al de los combustibles sólidos tradicionales, por lo que se considera que este material se puede utilizar como combustible para la obtención de energía aprovechable en procesos que requieran calor, por ejemplo, la fundición de metales. En este trabajo se generó el modelo de un horno de crisol para la fundición de aluminio, en el cual el calor requerido fue obtenido de una mezcla de metano y PP. Se llevó a cabo el diseño del quemador para sólidos. Se realizaron experimentaciones teóricas mediante el uso de técnicas CFD para la combustión de PP. La velocidad de alimentación del metano corresponde a 15 m/s y aire a 10 m/s. El PP se alimentó en polvo a razón de 0.1 kg/s. Se obtuvieron resultados numéricos y gráficos. La temperatura máxima alcanzada fue de 1600 K en el seno de la flama.

*Palabras clave:* polipropileno; combustión; horno de crisol; CFD.

## ANALYSIS OF PP POWDER COMBUSTION BEHAVIOR USING CFD

### Abstract

Polypropylene (PP) is one of the thermoplastic resins with the highest production volume (16% of the global plastics market), due to its properties such as corrosion resistance, excellent malleability, high tensile strength, and low density. However, it constitutes a significant source of solid waste, and its recovery is not always economically viable, so its disposal is generally realized by combustion in incinerators or furnaces. PP has been reported to have a calorific value of 46 MJ/kg, equivalent to that of traditional solid fuels, so this material is considered suitable for use as fuel to obtain useful energy in processes that require heat, for example, metal smelting. In this paper, a model of a crucible furnace for aluminum smelting was generated, in which the required heat will be provided by a mixture of methane and PP. For this, the solids burner was designed. Theoretical experiments were carried out using CFD techniques for PP combustion. Methane was fed at a velocity of 15 m/s and air at 10 m/s. PP powder was fed at a rate of 0.1 kg/s. Numerical and graphical results were obtained. The maximum temperature reached within the flame was 1600 K.

*Keywords:* Polypropylene; combustion; crucible furnace; CFD.

## 1. Introducción

El uso práctico de los plásticos ha aumentado rápidamente debido a sus propiedades que facilitan el procesamiento, la resistencia a la corrosión, buena maleabilidad, alta resistencia a la tracción y baja densidad (Mehta y col., 2021). Para el 2022 la producción de plástico fue de 413.8 Mt, de los cuales aproximadamente el 40 % se recicla, el resto se quema o desecha en vertederos y/o en espacio abiertos (Plastic Europe, 2024). Esta mala gestión de los plásticos amenaza gravemente los ecosistemas marinos y terrestres, porque estos residuos pueden persistir en el ambiente por cientos de años. Actualmente, la economía circular y la reducción de residuos proponen la correcta gestión de residuos, lo que incluye métodos de reciclaje adecuados (Blessy y col., 2021). Se han empleado diversos procesos de reciclaje incluyendo métodos mecánicos, químicos, biológicos, fotoquímicos, electroquímicos, esto se puede apreciar en la Figura 1 (Hahladakis y col., 2018) (Lee y col., 2025) (Kumar, 2020).



**Figura 1.** Procesos de reciclaje para plásticos.

El segundo polímero más consumido en el mundo es el polipropileno (PP), su fabricación representa el 16 % del mercado mundial. Es derivado de la olefina y se considera muy útil en muchas industrias, ya que puede calentarse, enfriarse y recalentarse sin causar una degradación significativa de su composición base. Con este material se producen diferentes productos como envases alimenticios, juguetes, muebles, textiles, piezas de automóviles, electrodomésticos, componentes médicos, entre otros (Blessy y col., 2021). Su creciente demanda ha provocado preocupación ambiental debido a que los residuos no son tratados siempre de forma adecuada. Se han realizado estudios para conocer el impacto ambiental provocado por este material y se proponen opciones para su tratamiento postconsumo, entre las cuales se incluye la incineración, la pirolisis, la

gasificación y el reuso y/o transformación mediante reciclaje primario y secundario (Alsabri y col., 2022).

Debido a su composición y heterogeneidad, los residuos plásticos presentan en la actualidad un desafío en el rubro del reciclaje. Procesos como la gasificación (Janajreh y col., 2020) (Vitale y col., 2024), pirolisis (Moranda y Paladino, 2023) (Aluri y col., 2018) y combustión/incineración (Elustondo y col., 2023) están siendo ampliamente estudiados. La combustión de plásticos es importante y se puede aprovechar su poder calorífico, pues el PP genera 46 MJ/kg de energía, lo cual es similar a la energía generada por la misma cantidad de carbón mineral (Biron, 2014). La evaluación de residuos plásticos como combustibles sólidos ha sido analizada, encontrando resultados favorables de conversión de CO<sub>2</sub> (Chiu y col., 2014). Devine y col., (2024) realizaron estudios experimentales para detallar el comportamiento de plásticos bajo diferentes condiciones de combustión, en los cuales determinaron la facilidad de ignición, la propagación de la flama, la masa involucrada, la combustión en capas, la formación de capas solidificadas y si el material permanecerá ardiendo tras retirar la fuente de calor externa. También se han realizado estudios de forma

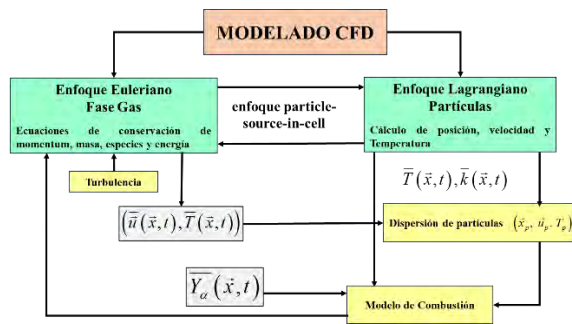
numérica aplicados a pirolisis y combustión, buscando la predicción de las condiciones óptimas para la operación de equipos y se han validado con datos experimentales (Rückert y col., 2020) (Sieradzka y col., 2014).

En este trabajo de investigación se realiza el análisis mediante CFD de la combustión de PP aplicado a un horno de crisol para la fundición de aluminio. Se analizaron resultados mediante gráficos de colores como contornos de presión, de velocidad, de temperatura y turbulencia, además de la obtención de datos numéricos como la fracción másica de los productos de la combustión de PP.

## 2. Configuración del modelo

La combustión de plásticos conlleva varios procesos, entre los cuales está la liberación de la humedad, la fusión de las partículas y la ignición del plástico. El modelo numérico del proceso de combustión en ANSYS Fluent versión estudiantil, se lleva a cabo según el diagrama presentado en la Figura 2. El modelo ejecuta un esquema euleriano para resolver la ecuación de la conservación de masa, momento y energía en la fase gaseosa, y paralelamente emplea un esquema

lagrangiano para obtener la posición, velocidad y temperatura de las partículas plásticas de la materia prima. El enfoque particle-source-in-cell se utiliza para acoplar los esquemas euleriano y lagrangiano, y la dispersión de partículas es resuelta de forma estocástica.



**Figura 2.** Diagrama de solución numérica para combustión de PP.

El modelado de la combustión de PP utiliza cuatro leyes conservativas: masa, momento, energía y transporte de especies en flujos multifásicos con reacción química. En este trabajo, el modelo de turbulencia utilizado fue el k-ε Estándar y la distribución de partículas sólidas mediante el modelo Rosin Rammler. Las ecuaciones que rigen el fenómeno físico se resumen como (ANSYS FLUENT, 2021):

### 2.1. Conservación de masa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

donde  $\rho$  es la densidad,  $\vec{v}$  el vector velocidad y  $S_m$  es un término fuente.

### 2.2. Conservación de momentum

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

### 2.3. Conservación de energía

$$\frac{\partial (\rho e_t)}{\partial t} + \nabla \cdot [\vec{v}(\rho e_t + p)] = -\nabla \cdot \left[ \sum_j h_j J_j \right] + S_h \quad (3)$$

donde  $e_t$  es la energía interna total,  $h_j$  entalpía de especies,  $J_j$  es el flux másico y  $S_h$  es el término fuente de generación de energía.

### 2.3. Conservación de especies

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (4)$$

donde  $Y_i$  es la fracción masa de cada especie.  $R_i$  es la tasa neta de producción de especies por reacción química,  $S_i$ , es la tasa de creación por adición de la fase dispersa más cualquier fuente definida por el usuario y  $J_i$  es el flux difusivo de especies.



### 3. Dominio computacional

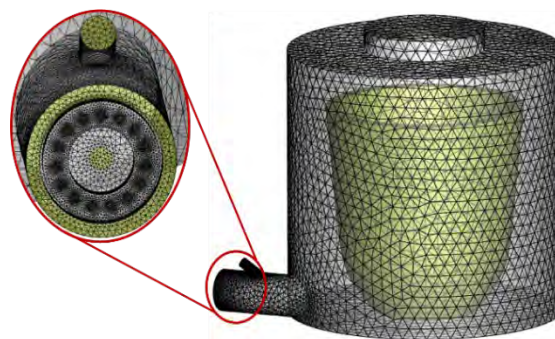
El horno se encuentra en las instalaciones del taller de Metalurgia en la Universidad Politécnica de Juventino Rosas, ver Figura 3. Tiene una altura de 0.73 m y un diámetro de 0.70 m. el horno se encuentra cubierto por una capa de cemento refractario de 0.1 m y el exterior es de placa de acero al carbón de 0.01 m de espesor. El crisol tiene forma de cono truncado en la parte superior e inferior y tiene un espesor de 0.015 m y está fabricado de grafito, pero para fines prácticos, no se considera la transferencia de calor por las paredes, solo se estudia el proceso de combustión. Al horno se le adapto la entrada del quemador y una entrada especial para la alimentación del PP molido.



**Figura 3.** Modelo del horno.

Este modelo se generó en CAD y se discretizó en el software ANSYS Mesh. El modelo

mallado consta de 142,350 volúmenes de control y 28,599 nodos (Figura 4). La malla es no estructurada debido a la complejidad del modelo.



**Figura 4.** Modelo mallado y acercamiento a quemador.

La salida de los gases de combustión se definió como *pressure\_outlet* y la alimentación de los gases como *velocity\_inlet*. El modelo viscoso utilizado para la generación de la turbulencia fue el k-ε Estándar, mientras que el transporte de masa fue realizado con el modelo *Species Transport*. El modelo de fase discreta se utilizó para alimentar el combustible sólido (PP) a razón de 0.1 kg/s. La velocidad de alimentación del metano fue de 30 m/s a 278 K, considerando metano puro. El aire se alimentó a una velocidad de 20 m/s precalentado a 600 K. El PP es arrastrado por aire a velocidad de 0.5 m/s con una corriente de aire caliente a 600 K. Se considera que las

paredes del horno y del crisol están precalentadas a 900 K.

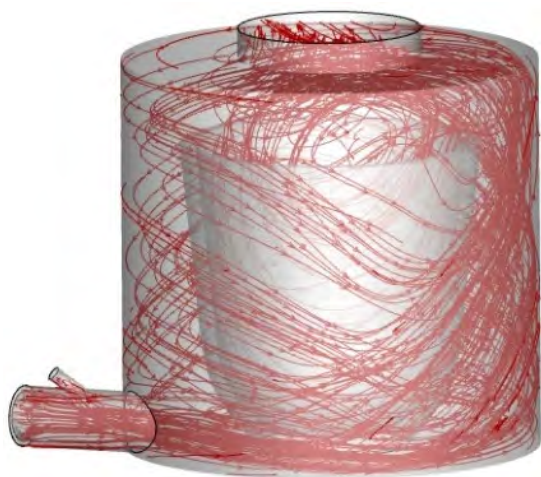
Las ecuaciones gobernantes fueron acopladas con el método COUPLED. La presión se discretizó mediante el uso del modelo PRESTO. Las simulaciones fueron realizadas en estado transitorio para 1000 pasos de tiempo, en espacios temporales de 0.01 s, lo que resulta en una simulación de 10 s de tiempo real.

#### **4. Resultados**

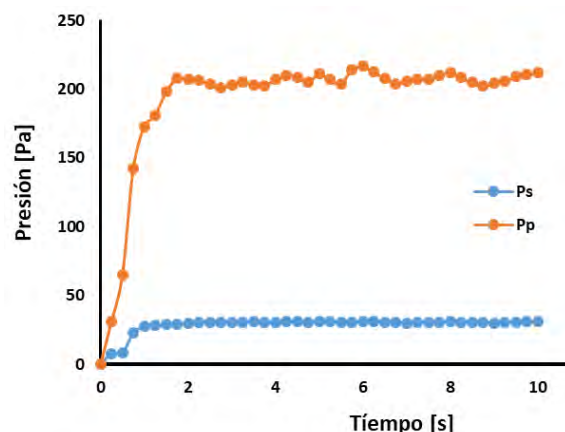
La combustión eficiente y controlada es necesaria para maximizar la generación de energía y minimizar las emisiones contaminantes. La caracterización detallada dentro de un horno de crisol implica medir y analizar variables como la presión, la temperatura y las concentraciones de especies químicas en diferentes ubicaciones. Esto permite identificar posibles problemas de funcionamiento, optimizar el diseño de los componentes y ajustar los parámetros operativos para mejorar el rendimiento general. El uso de herramientas como CFD permite visualizar el flujo de fluidos, la transferencia de calor y las reacciones químicas dentro del horno.

##### *4.1. Hidrodinámica del horno*

La alimentación de los gases de combustión es realizada por el quemador, el cual se encuentra en la parte inferior, por lo que los gases están condicionados a moverse por la cámara de combustión. Al dar la vuelta al crisol, estos gases chocan con los gases alimentados y generan remolinos dentro de la cámara de combustión. Parte de los gases al chocar con la tapa del horno tienden a descender y esto provoca que entren a la parte interna del crisol, esto se muestra en la Figura 5. Las velocidades medidas en la salida de los gases fueron durante la simulación promedio los 13.8 m/s, mientras que la velocidad promediada en la cámara de combustión fue de 25.5 m/s. Esto se debe a que los gases en la salida van directamente a la atmósfera, mientras que en la parte interna se promedian todos los gases involucrados, incluyendo los cambios provocados por el cambio de volumen cuando se genera la reacción de combustión del PP y el metano con el oxígeno contenido en el aire de alimentación.



**Figura 5.** Líneas de corriente.



**Figura 6.** Gráfico de tiempo [s] contra presión [Pa].

La combustión de los gases alimentados y del PP genera temperaturas elevadas, por lo que los gases se expanden debido a la disminución de su densidad. La presión promediada ( $P_p$ ) medida dentro del horno fue de 210 Pa, mientras que en la salida también se midió la presión ( $P_s$ ) y el valor obtenido fue de 30 Pa, esto valores se mantiene constantes, tal como se observa en la Figura 6. Las presiones bajas se deben al movimiento acelerado de los gases, lo cual contribuye a una buena distribución del calor por convección.

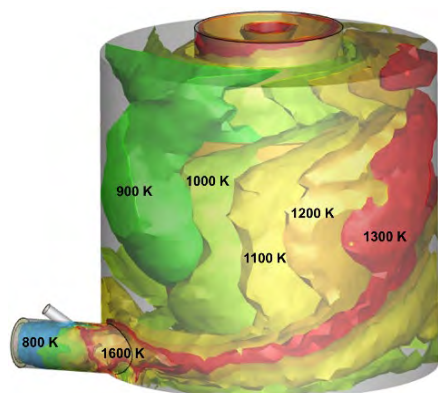
#### 4.2. Análisis térmico

La combustión es una reacción de oxidación química que implica el desarrollo de luz y calor. Hay tres elementos necesarios para la combustión: una (o más) sustancia combustible, una (o más) sustancia oxidante y una fuente de ignición. En este trabajo el combustible se presenta de forma sólida (PP) y se tiene presente una flama para que se realice el proceso de ignición, la cual es por medio de la combustión de metano con el oxígeno contenido en el aire.

La reacción de combustión genera temperaturas elevadas, las cuales alcanza un máximo de 1600 K en la parte lateral del cono de la flama, mientras que el cono principal



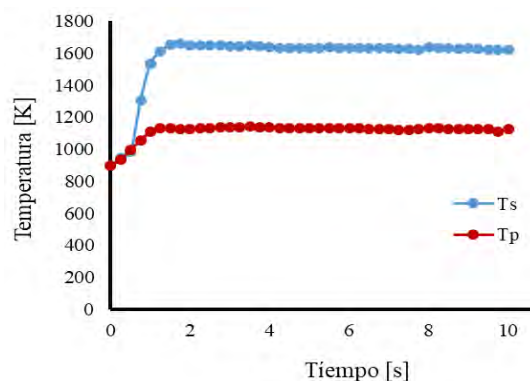
rodea al crisol y tiene una temperatura de 1300 K. La Figura 7 muestra las isosuperficies de temperatura formadas dentro de la cámara de combustión, en la cual se observa la forma en que se mezclan los gases a diferentes temperaturas y el cómo se distribuyen dentro del horno.



**Figura 7.** Isosuperficies de temperatura [K].

Los gases se alimentan a temperaturas bajas y se mezclan con los gases de combustión, que tiene temperaturas elevadas, generando que se obtenga una temperatura promedio ( $T_p$ ) de 1150 K, pero en la salida se midieron temperaturas máximas ( $T_s$ ) de 1600 K, esto se debe a que la flama alcanza la salida del horno (color rojo), tal como lo muestra la Figura 8. Estas temperaturas demuestran que es factible utilizar el PP como combustible aplicado a la fundición de aluminio, el cual tiene su punto de fusión a los 933.5 K. Además, la ignición del PP ocurre en un rango de temperatura de

663-683 K, por lo que la precalentar el horno a 900 K se garantiza que el PP se queme en su totalidad.



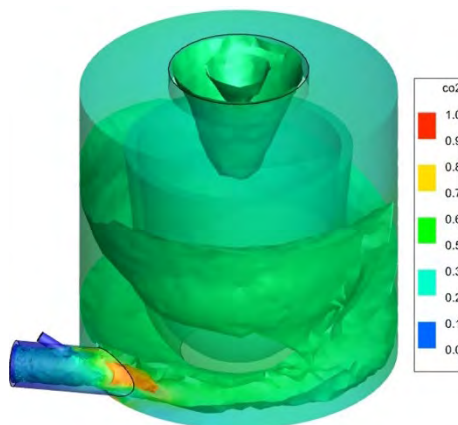
**Figura 8.** Gráfico de tiempo [s] contra temperatura [K].

#### 4.3. Análisis de gases de combustión

Desde el punto de vista técnico, la combustión de plásticos se puede dividir en dos etapas: la fase de ignición y la fase de combustión. Durante la etapa de ignición, el aire y el combustible interactuarán, el CO se forma por una reacción exotérmica súbita. La reacción posterior de CO a  $\text{CO}_2$  es lenta y requiere un tiempo de residencia adecuado para completarse. Mientras que la fase de combustión intensa se da cuando la concentración de  $\text{CO}_2$  es máxima y la de CO es mínima. En este trabajo de investigación se considera que se quema PP y que la reacción de combustión que se presenta es total, produciendo solamente  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ .

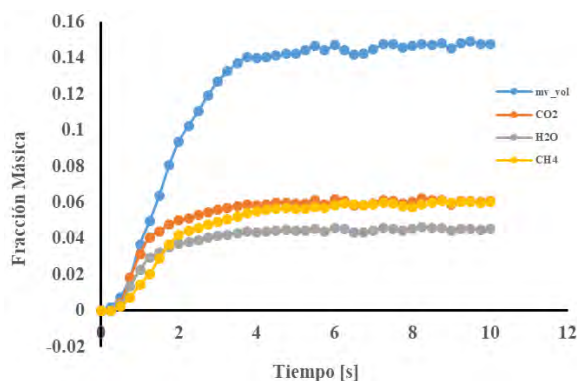
Primeramente el PP funde (433-443 K) y luego se degrada térmicamente en productos volátiles por encima de 533 K y se degrada totalmente a una temperatura de 756 K.

La Figura 9 muestra las isosuperficies de fracción másica de  $\text{CO}_2$ , las cuales están presentes en concentraciones de 0.107 ppm. Se puede observar que la mayor concentración de este compuesto se da en la entrada del horno, es decir, donde se lleva a cabo la reacción de combustión y se presenta con un color anaranjado. Después se distribuye por toda la cámara de combustión. También se midieron las concentraciones de vapor de agua, obteniendo que se presenta en 0.08 ppm y la de metano que se quema casi en su totalidad, presentándose en cantidades de 0.13 ppm, esto porque el valor es calculado con el promedio desde la entrada hasta la salida. Al quemar compuestos sólidos se producen cenizas, las cuales pueden estar presentes en forma volátil las cuales son arrastradas por el flujo de gases de combustión, o concentrarse en la parte inferior del horno. Las partículas volátiles presentes tienen una concentración de 0.31 ppm dentro de la cámara de combustión.



**Figura 9.** Isosuperficies de fracción másica de  $\text{CO}_2$ .

La Figura 10 muestra un gráfico de fracción másica de gases dentro de la cámara de combustión respecto al tiempo. Se puede apreciar que el compuesto presente en menor concentración es el vapor de agua, el cual lo representa la línea gris. El máximo valor obtenido fue 0.04 y se da en un tiempo de 3 s aproximadamente. El compuesto presente en mayor cantidad son los sólidos volátiles que están presentes en una cantidad de 0.14 y se estabiliza aproximadamente después de 4 s de haber iniciado el proceso de combustión (línea azul).



**Figura 10.** Gráfico de tiempo [s] contra fracción másica.

## 5. Conclusiones

Se realizó el análisis mediante CFD del proceso de combustión de PP aplicado a un horno de crisol utilizado para la fundición de aluminio. El análisis hidrodinámico muestra que el modelo k-ε estándar predice de forma adecuada el movimiento de los gases de combustión, pues se observan remolinos formados por el choque de los flujos de las corrientes de los gases de alimentación y los gases de combustión, lo cual se observa mediante las líneas de corriente. De igual manera se presentan remolinos en la salida del horno.

Las temperaturas presentadas alcanzan los 1600 K en el seno de la flama, mientras que la temperatura promediada en la cámara de combustión es de 1300 K lo que indica que es factible el uso del PP como combustible para

la fundición de aluminio. Además, como el PP funde por debajo de los 700 K, el precalentar el horno a 900 K asegura que la combustión de este material sea total.

Las concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub> muestran que la combustión es total y alcanzan su estabilidad a los 2 s de iniciar la reacción de combustión. Esto significa que al realizar una combustión controlada se garantiza el consumo total del PP, generando pocos o nulos subproductos de reacción.

El análisis de los perfiles de velocidad, temperatura y fracción másica permiten una mayor comprensión del fenómeno de combustión dentro de un horno de crisol. Esto permite el realizar experimentaciones numéricas con variación de los parámetros geométricos o de los flujos de alimentación y que se puedan obtener datos confiables para diseños futuros.

## Referencias bibliográficas

Alsabri, A., Tahir, F., Al-Ghamdi, S.G. (2022). Environmental impacts of polypropylene (PP) production and prospects of its recycling in the GCC region. *Materials Today: Proceedings*, 56, 2245-2251. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.574>

Aluri, S., Syed, A., Flick, D.W., Muzzy, J.D., Sievers, C., Agrawal, P.K. (2018). Pyrolysis and gasification studies of model refuse derived fuel (RDF) using thermogravimetric analysis. *Fuel Processing Technology*, 179, 154-166.

<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.06.010>

ANSYS FLUENT, 2021, User's and theory guide. Canonsburg, Pennsylvania, USA: ANSYS, Inc.

Biron, M. (2014). Thermosets and composites: Technical information for plastics users. 2nd ed. Elsevier, 28. ISBN: 978-1-85617-411-4.

<https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-411-4.X5000-1>

Blessy, J., Jemy, J., Nandakumar, K., Sabu, T. (2021). Recycling of medical plastics. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4, 3, 199-208.

<https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.06.003>

Devine, C., Flores-Quiroz, N., Walls, R. (2024). Combustion and free burning behaviour of recycled plastic pellets. *Journal of Physics: Conference Series*, 2885, 012022. 10.1088/1742-6596/2885/1/012022

Elustondo, D., Tanjay, Q., Robertson, M., Cooke-Willis, M., Theobald, B., McKinley,

R., Gaugler, M. (2023). Reaction temperature, heat of combustion, and main chemicals produced by hydrothermal oxidation of polypropylene. *Cleaner Engineering and Technology*, 12, 100595.

<https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100595>

Hahladakis, J.N., Velis, C.A., Weber, R., Iacovidou, E., Purnell, P. (2018). An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use. *Disposal and Recycling, Journal Hazardous Materials*, 344, 179-199,

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.014>

Janajreh, I., Adeyemi, I., Elagroudy, E. (2020). Gasification feasibility of polyethylene, polypropylene, polystyrene waste and their mixture: Experimental studies and modeling. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 39, 100684.

<https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100684>

Kumar, R. (2020). Tertiary and quaternary recycling of thermoplastics by additive manufacturing approach for thermal sustainability. *Materials Today: Proceedings*, 37, 2, 2382-2386.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.183>

Lee, J.E., Lee, D., Lee, J., Park, Y.K. (2025). Current methods for plastic waste recycling: Challenges and opportunities. *Chemosphere*, 370, 143978. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143978>

Mehta, N., Cunningham, E., Hanna, P., Cestari, S.P., Martin, P., Smyth, B. (2021). Life cycle assessment of production of showcase objects from recycled plastics. *Global. Research & Innovation in Plastic Sustainability*.

Moranda, A. & Paladino, O. (2023). Controlled Combustion and Pyrolysis of Waste Plastics: A Comparison Based on HumanHealth Risk Assessment, *Recycling*, 8, 38. <https://doi.org/10.3390/recycling8020038>

Ping-Chin, C., Young K., Hsuan-Chih W., Yu-Lin K., Yao-Hsuan T. (2014). Chemical looping combustion of polyurethane and polypropylene in an annular dual-tube moving bed reactor with iron-based oxygen carrier. *Fuel*, 135, 146-152. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.040>

Plastic Europe. (2024). Word plastic production.

<https://plasticseurope.org/es/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2024/> (consultado 29/06/2025)

Rückert, F.U., Lehser-Pfeffermann, D., Theis, D., Kim, J.P., Schargen, A., Zorbach, I., Sohnemann, J. (2020). A new Simulation Model for Grate Firing Systems in OpenFOAM. *Energy*, 216, 119226. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119226>

Sieradzka, M., Rajca, P., Zajemska, M., Mlonka-Medrala, A., Magdziarz, A., (2020). Prediction of gaseous products from refuse derived fuel pyrolysis using chemical modelling software- Ansys Chemkin-Pro. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119277. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119277>

Vitale, A., Papa, A.A., Di-Carlo, A., Rapagn, S. (2024). Three-dimensional computational fluid-dynamic simulation of polypropylene steam gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 95, 1328-1341. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.09.101>