

# Estudio mediante cfd del efecto del fenómeno de radiación en la combustión de pet.

Edilberto Murrieta Luna<sup>a,\*</sup>, Mario Alberto Rodríguez Angeles<sup>a</sup>, Lázaro Canízales Dávalos<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Universidad Politécnica de Juventino Rosas, Santa Cruz de Juventino Rosas, Guanajuato, México

<sup>b</sup>Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, Zacatecas, México

*Study by cfd of the effect of the radiation phenomenon on the combustion of pet.*

*Estudi mitjançant cfd de l'efecte del fenomen de radiació a la combustió de pet.*

RECEIVED: 4 OCTOBER 2021; REVISED: 29 APRIL 2022; ACCEPTED: 28 JUNE 2022

## ABSTRACT

PET is one of the most handled polymeric materials in different areas: medical devices, cables, toys, beverage bottles, among others. Generate energy is the main objective of quaternary recycling. PET has many uses; for instance, we can produce energy from the reuse of PET. The heat recovered can be used in foundry processes such as non-ferrous metals. If PET allows burned under controlled temperature conditions, the thermal reaction yields two products, water and carbon dioxide, and this combustion is considered a clean process. Thus, PET combustion can be considered as a thermal radiation phenomenon. This study investigated the thermal radiation in a PET burner with computational fluid dynamics analyze, by applying the radiation model P1. The oxidation of PET produced the combustion reaction. The calculations determined that the combustion chamber reached a temperature of 1470 K. The numerical temperature and mass fraction results confirmed that PET combustion is a clean process and is viable for use in the aluminium foundry.

**Keyword:** *PET, combustion, CFD, radiation.*

## RESUMEN

El tereftalato de polietileno (PET) es uno de los materiales poliméricos más utilizados en diferentes áreas como: dispositivos médicos, cables, juguetes, botellas para bebidas, entre otros. El reciclaje cuaternario tiene como objetivo aprovechar el potencial energético y calorífico del PET. El calor recuperado puede utilizarse en

procesos como la fundición de metales no ferrosos. Si el PET se quema en condiciones controladas, los únicos productos de la reacción serán el agua y el dióxido de carbono, por lo tanto, esta combustión se considera como un proceso limpio. Cuando se realiza el proceso de combustión de PET, se presenta el fenómeno de radiación térmica. Este estudio investiga mediante CFD el comportamiento de la radiación en un quemador de PET, utilizando el modelo de radiación P1. La reacción de combustión se genera por la oxidación del PET con Oxígeno. Los cálculos determinaron que la temperatura media alcanzada fue de 1470 K dentro del quemador. Los perfiles de temperatura y de fracción másica, confirmaron que la combustión de PET es una combustión limpia y que es viable para utilizarse en el proceso de fundición de aluminio.

**Palabras clave:** *PET, combustión, CFD, radiación.*

## RESUM:

El tereftalat de polietilè (PET) és un dels materials polimèrics més utilitzats en diferents àrees com: dispositius mèdics, cables, joguines, ampolles per a begudes, entre d'altres. El reciclatge quaternari té com a objectiu aprofitar el potencial energètic i calorífic del PET. La calor recuperada es pot utilitzar en processos com la fosa de metalls no ferrosos. Si el PET es crema en condicions controlades, els únics productes de la reacció seran laigua i el diòxid de carboni, per tant,

\*Corresponding author: [emurrieta\\_ptc@upjr.edu.mx](mailto:emurrieta_ptc@upjr.edu.mx)

aquesta combustió es considera com un procés net. Quan es fa el procés de combustió de PET, es presenta el fenomen de radiació tèrmica. Aquest estudi investiga mitjançant CFD el comportament de la radiació en un cremador de PET, utilitzant el model de radiació P1. La reacció de combustió es genera per l'oxidació del PET amb Oxigen. Els càlculs van determinar que la temperatura mitjana assolida va ser de 1470 K dins del cremador. Els perfils de temperatura i de fracció màssica van confirmar que la combustió de PET és una combustió neta i que és viable per utilitzar-se en el procés de fosa d'alumini.

**Paraules clau:** PET, combustió, CFD, radiació.

## INTRODUCCIÓN

Las actividades económicas e industriales generan residuos que son un problema medioambiental y económico. Actualmente en México, los residuos sólidos son tratados con técnicas rudimentarias y utilizando equipos obsoletos y adaptando espacios fuera de las manchas urbanas como rellenos sanitarios. Los vertederos de residuos sólidos son una amenaza ambiental ya que generan contaminación del aire y del subsuelo y del agua subterránea debido a los lixiviados<sup>1</sup>. Por esta razón, se están desarrollando nuevas tecnologías que permitan aprovechar los residuos plásticos como proveedores de energía. En un estudio<sup>2</sup> se reporta que mediante la combustión se pueden reducir los residuos sólidos hasta en un 90%, generando residuos inertes los cuales pueden depositarse en el suelo o mezclarse con materiales de construcción.

Entre los materiales más utilizados y de los cuales se generan más residuos sólidos está el Tereftalato de Polietileno (PET)<sup>3</sup>. El PET es un material que se puede reciclar por alguno de los cuatro métodos de reciclado, de los cuales el reciclaje cuaternario tiene como objetivo el aprovechar el potencial energético y calorífico que este material puede generar<sup>4</sup>. El PET tiene una alta estabilidad térmica, iniciando su auto-ignición a los 600°C<sup>5</sup>. Si el PET se quema en condiciones controladas, los únicos productos de la reacción serán el agua y el dióxido de carbono, lo que se considera como una combustión limpia<sup>6</sup>. Además, algunos autores<sup>7</sup> reportan que la combustión del PET puede generar hasta 1475.73 kJ/kg, donde el calor obtenido puede ser utilizado en procesos como fundición de metales no ferrosos, generación de vapor, cocción de ladrillos, entre otros.

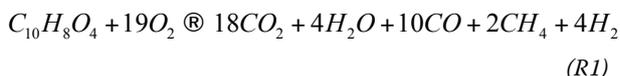
Al realizarse el proceso de combustión de PET se genera el fenómeno de radiación térmica, la cual es la principal forma de transferencia de calor entre las llamas y el ambiente circundante dentro de la región de combustión<sup>8</sup>, de aquí que, para cuantificar la cantidad de calor aprovechable dentro del quemador, resulta muy importante realizar mediciones confiables de la cantidad de radiación emitida por la flama. Se han realizado estudios numéricos del efecto de la radiación en combustión de oxicomcombustibles<sup>8,9</sup> donde determinan que las moléculas grises

de CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>O son las principales contribuyentes al fenómeno de radiación. En otros trabajos<sup>10,11</sup> se estudia la radiación mediante CFD en quemadores industriales, involucrando el análisis de la radiación emitida por la flama, la radiación emitida por las paredes y la radiación reflejada por las paredes. El modelo P1 utilizado para modelar la radiación es en particular muy rápido y eficiente<sup>12,13</sup>. En este trabajo de investigación se estudia el comportamiento de la radiación en un quemador de PET, implementando simulaciones de CFD, utilizando el modelo P1 para la simulación de la radiación. Debido a la complejidad del fenómeno de combustión, se sintetiza la reacción a la producción de solo 5 productos, despreciando subproductos que se reportan en cantidades muy pequeñas<sup>6</sup>. El quemador propuesto es semi-industrial y solo presenta la entrada de los gases y la zona de combustión de la flama en 3D. Con los resultados obtenidos se determinó la viabilidad del uso del PET en la fundición de metales no ferrosos.

## ESQUEMA COMPUTACIONAL

### MODELO DE COMBUSTIÓN

Debido a la estructura química del PET, la cinética de su combustión es altamente complicada. Algunos autores<sup>6</sup> han determinado que cuando se tiene una combustión no controlada del PET, pueden generarse alrededor de 80 productos de reacción, algunos de los cuales son altamente tóxicos, aunque aparecen en cantidades bajas. Por otro lado, para una concentración controlada, la cantidad de productos de reacción baja considerablemente a unos 30<sup>5</sup>, siendo el metano el único producto de combustión (además del CO, CO<sub>2</sub> y agua) que aparece en una concentración considerable, ya que todos los demás compuestos juntos no superan las 125ppm. Debido a esto, en este trabajo se consideró que la reacción de combustión del PET de forma simplificada produce solamente cinco productos de reacción: CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y H<sub>2</sub>, como lo muestra R1. Adicionalmente, se consideran también las reacciones secundarias de los productos de la primera reacción R2 y R3.



Para modelar la turbulencia generada dentro del quemador de PET, se utilizó el modelo de dos ecuaciones K-ε realizable, mientras que las ecuaciones gobernantes fueron acopladas mediante el modelo COUPLED. Como algoritmo de discretización para la presión se utilizó el esquema PRESTO, mientras que para las ecuaciones de momentum, energía de tur-

bulencia cinética, velocidad de disipación turbulenta y energía fueron discretizados mediante el esquema Second Order Upwind Scheme. El modelo Finite-Rate/Eddy Dissipation Concept es usado para contestar el transporte de especies y con la turbulencia.

El transporte de especies químicas en el análisis numérico fue modelado por

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} Y_i) = -\nabla \cdot \bar{J}_i \quad (1)$$

Donde  $Y_i$  representa la fracción másica local de especies para la  $i$ -ésima especie

## MODELO DE RADIACIÓN

La simulación de la radiación mediante el software ANSYS<sup>14</sup> se utilizó el modelo P1 el cual presenta la ventaja de que es computacionalmente barato, permite trabajar con dispersiones de partículas. Este modelo se basa en una ecuación para el flujo de radiación (2)

$$q_r = -\Gamma \nabla G \quad (2)$$

donde  $a$  es el coeficiente de absorción,  $s_s$  es el coeficiente de dispersión,  $G$  es la radiación incidente,  $C$  es el coeficiente de la función de fase anisotrópica lineal y  $G$  puede obtenerse por (3).

$$\Gamma = -\frac{1}{3(a + \sigma_s) - C\sigma_s} \quad (3)$$

Dado que la ecuación de transporte para  $G$  es (4)

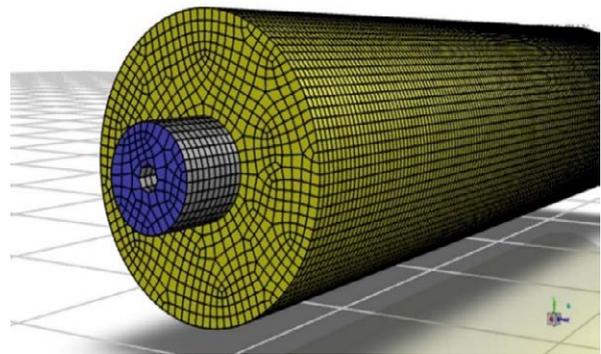
$$\nabla \cdot (\Gamma \nabla G) - aG + 4an^2 \sigma T^4 = S_G \quad (4)$$

donde  $n$  es el índice de refracción del medio,  $s$  es la constante de Stefan-Boltzmann ( $5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ) y  $S_G$  es un término fuente, el término en la ecuación de calor debido a la radiación puede calcularse por (5).

$$-\nabla \cdot q_r = aG - 4an^2 \sigma T^4 \quad (5)$$

## MODELO GEOMÉTRICO

El modelo generado está determinado por dos tubos concéntricos, de los cuales en el tubo exterior se presenta la entrada del aire y en el tubo interior se inyecta el PET triturado arrastrado por una corriente de aire, tal como se muestra en la Figura 1. El tubo exterior tiene un diámetro de 0.10 m y el tubo interior es de 0.025 m de diámetro. En la salida del quemador se modela la cámara de combustión la cual es de forma cilíndrica con diámetro de 0.3 m. Se generó una malla no estructurada que consta de tetraedros híbridos, obteniendo 105 550 celdas.



**Figura 1.** Modelo del quemador mallado.

La corriente de aire que ingresa al quemador tiene una velocidad de 20 m/s a temperatura de 600 K, lo que indica que ha sido precalentada. La velocidad de entrada del gas metano es de 15 m/s, el diámetro hidráulico tiene dimensiones de 0.075 m y la temperatura de alimentación es de 298 K. El PET fundido es alimentado mediante una corriente lateral y es arrastrado por una corriente de aire caliente (600 K) velocidad de 0.05 m/s (0.1 kg/s). Las paredes del horno al inicio de la simulación se suponen precalentadas a 900 K de temperatura.

El modelo numérico implica resolver las diversas ecuaciones de conservación que gobiernan el flujo, la transferencia de calor, las reacciones químicas, el modelo de radiación y sus interacciones dentro de la cámara de combustión. La ecuación de presión se discretiza usando el esquema estándar de segundo orden, mientras que la ecuación de continuidad y las ecuaciones de momentum se discretizan usando un esquema de second-order upwind. El método COUPLED se usa para el acoplamiento presión-velocidad. Las condiciones de límite de velocidad se establecen en la entrada de flujo (mezcla de combustible y aire), mientras que la presión manométrica se considera cero.

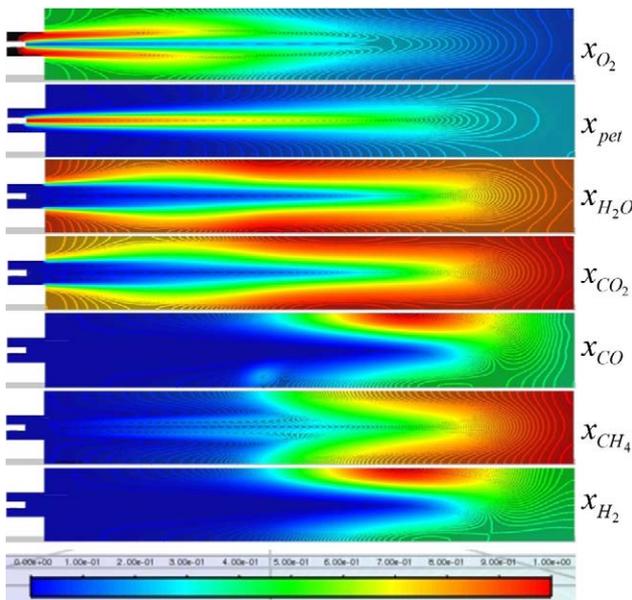
Estudios realizados a diferentes tamaños de malla muy fina determinaron que se genera inestabilidad en la combustión y que este tipo de malla no garantiza la precisión en los resultados frente a una malla gruesa, aunado a esto, se incrementa el coste computacional y temporal<sup>15,16,17</sup>. Por esta razón, no se realizó un análisis de sensibilidad a las mallas utilizadas para realizar este trabajo de investigación.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### ANÁLISIS DE FRACCIONES MÁSICAS

La Figura 2 muestra los contornos de fracción másica obtenidos de la simulación de la combustión de PET con  $O_2$ . Se puede observar que la fracción másica del oxígeno disminuye, esto debido a la reacción con el PET y las reacciones secundarias con el CO y el  $H_2$ . El máximo de  $O_2$  se presenta en la alimentación del aire al quemador, teniendo finalmente en la salida la disminución debida que en esta parte del quemador existe una mezcla de gases de alimentación con gases de reacción. El PET se consume parcialmente, pues se reporta en la salida una fracción másica de 0.25, lo que indica que

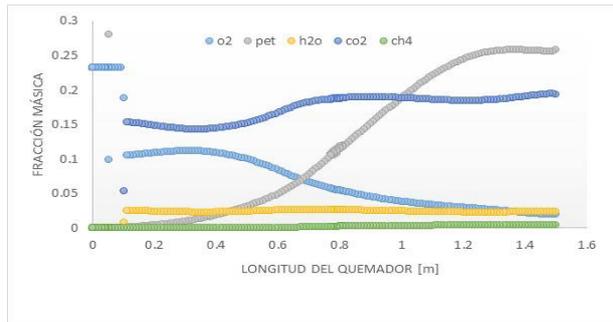
la combustión se está realizando de forma parcial. Esto se puede atribuir a que el largo del quemador es muy pequeño, en comparación de los quemadores presentados en los trabajos<sup>9,11</sup>. Las fracciones máxicas de H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> reportadas son de 0.02711 y 0.1952 respectivamente. Estas se presentan al final de quemador, mezclándose con los demás gases presentes. En la entrada del quemador la presencia de estos gases es nula, pues se inyecta aire seco y se generan solamente de la reacción de oxidación del PET con el O<sub>2</sub>. El CO y el H<sub>2</sub> generados reaccionan con el O<sub>2</sub>, en las reacciones secundaria, por lo que son reportados en cantidades cercanas a cero. Lo que significa que se incrementa la producción de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, pudiendo decir que se tiene una combustión limpia, en lo que respecta a estos dos gases. La formación máxica de metano se presenta en bajas cantidades en la salida del quemador, la cantidad máxica reportada es de 0.0045 y no se alcanza a oxidar por completo, lo cual se atribuye de igual manera a que el quemador no es lo suficientemente largo.



**Figura 2.** Contornos de fracción máxica.

La alimentación del PET se ve disminuida drásticamente en la entrada del quemador y a los inicios de la reacción de oxidación. Los contornos de fracción máxica del PET muestran que en la salida del quemador aún están presentes partículas de PET, por lo que queda como trabajo a futuro realizar pruebas con medidas más grandes del quemador. El O<sub>2</sub> es alimentado en

forma de aire seco a fracción máxica de 0.23, presentando una disminución hasta una fracción máxica de 0.02 en la salida del quemador. La presencia de gases como el H<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub>, se observaron en toda la longitud del quemador, manteniendo niveles bajos y constantes. La fracción máxica del CO<sub>2</sub> es elevada, alcanzando niveles de fracción máxica entre 0.15 y 0.2 durante todo el largo del quemador, teniendo resultados muy similares a los presentados en los contornos de fracción máxica de CO<sub>2</sub> en la Figura 3.

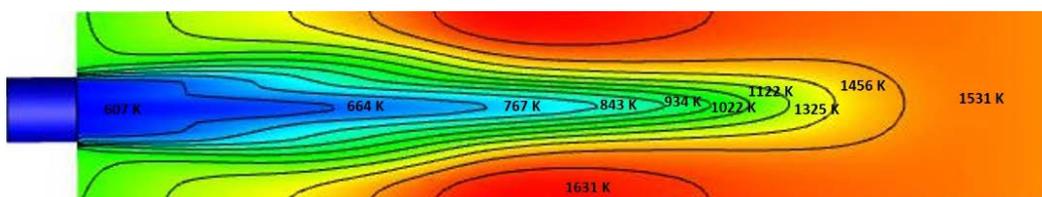


**Figura 3.** Gráfico longitud del quemador contra fracción máxica de reactivos y productos de reacción.

### ANÁLISIS DE TEMPERATURA

La Figura 4 muestra los contornos de temperatura en la cámara de combustión (quemador) a presión atmosférica. Se muestran las temperaturas medidas a diferentes distancias. Se puede apreciar que la temperatura máxica alcanzada es de 1631 K, la cual se presenta en la zona de combustión (x = 1 m, medidos desde la entrada). En la salida del quemador, se presenta una temperatura de 1531 K, la cual es resultado de la mezcla de los gases de la reacción de combustión y los reactivos de alimentación que no reaccionaron y se alimentan a 600 K. La temperatura media obtenida fue de 1473 K, mediante este resultado podemos deducir, que la energía obtenida en la combustión del PET, puede emplearse para la fundición de aluminio, el cual funde a 933 K aproximadamente.

Los gases alimentados al quemador tienen velocidades elevadas, lo que provoca que se forme un cono de gases sin reaccionar, y que son alimentados a 600 K (zona color azul). Esto gases se mezclan y provocan la reacción de combustión, lo que genera calor, provocando a su vez un incremento en el volumen de la mezcla de gases calientes, los cuales continúan reaccionando y



**Figura 4.** Contornos de temperatura [K] en cámara de combustión a presión atmosférica.

generando el calor suficiente para que el PET se quem. La zona más caliente (color de naranja a rojo) es la zona que está en contacto directo con el crisol donde se fundirá el aluminio, lo que asegura que las temperaturas alcanzadas dentro del crisol sean superiores a la temperatura de fundición del aluminio.

Las pruebas numéricas serán llevadas finalmente a su aplicación experimental en un horno de crisol para fundición de metales no ferrosos.

### ANÁLISIS DE RADIACIÓN

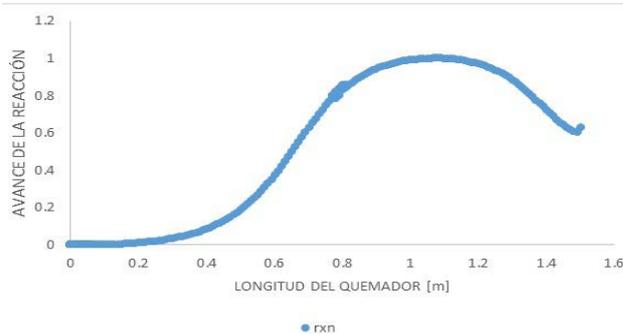
La simulación de la radiación térmica se llevó a cabo mediante el modelo P1, instalado en ANSYS FLUENT en el cual se consideran los gases como partículas grises. Se consideró el coeficiente de absorción con un valor de 0.9, el índice de refracción de 1.55 y el coeficiente de dispersión de  $0.6^{10,18}$ . La Figura 5a muestra los contornos de temperatura generados por la simulación de la combustión de PET sin modelar la radiación térmica, en la cual las temperaturas máximas se presentan a una distancia de 1 m a partir de la entrada de los gases. Al graficar los contornos de temperatura para el modelo de combustión aplicando el modelo P1 de radiación (Figura 5b), se puede apreciar que los valores máximos de la fuente de radiación térmica se presentan en la región de la flama. Esto se debe a que la temperatura del horno aumenta con la liberación de calor aumentando la radiación térmica en la región de combustión. En la salida del quemador se presenta una baja en la generación de la radiación, aproximadamente un 50 % del máximo, lo cual se predice mediante el código de colores, amarillo en la salida y rojo en el máximo. Así mismo, se puede atribuir a que en la salida se presenta una mezcla de cenizas y la disminución de la temperatura por la mezcla de gases de combustión con los gases fríos que no reaccionaron.

La Figura 5c, muestra el gráfico de temperatura, comparando la temperatura de la combustión de PET con  $O_2$ , sin aplicar el modelo de radiación (color azul) y

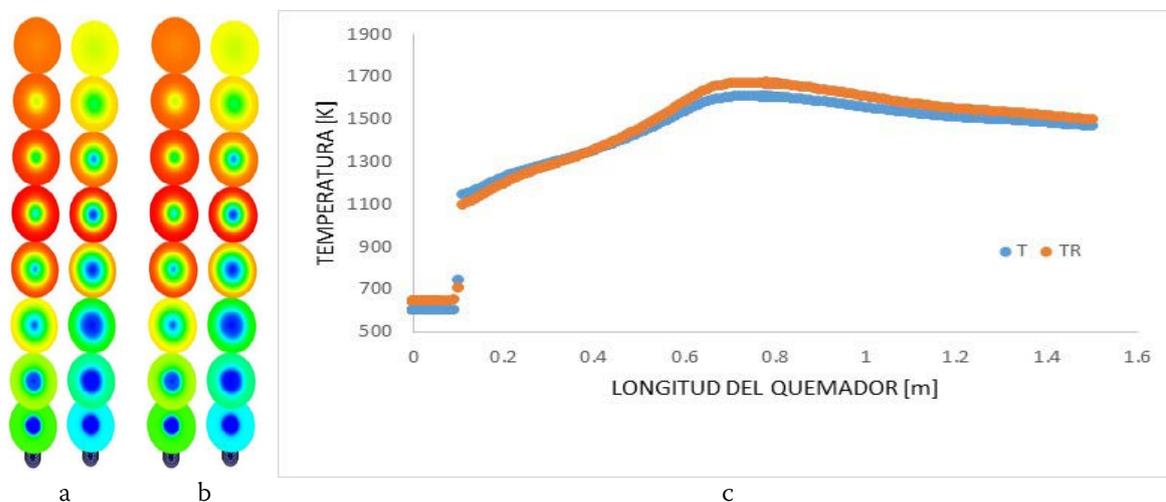
los datos obtenidos de la simulación con la aplicación del modelo P1 de radiación. En este gráfico se puede apreciar que se genera una diferencia máxima de 50 K a una distancia de entre 0.8 y 1.2 m, lo cual coincide con el cono principal formado por la flama. En la salida del quemador se presenta una disminución de la radiación térmica, la cual se ve reflejada también en la temperatura media final de 1490 K para la simulación con radiación y 1473 K de temperatura media para el modelo simulado sin radiación.

### AVANCE DE LA REACCIÓN

La Figura 6 muestra el gráfico del avance de la reacción, en la cual se puede analizar que alcanza la conversión máxima de reactivos a productos en una distancia aproximada de 0.8 m a 1.2 m. En la entrada del quemador la conversión es mínima, ya que es la parte más fría del quemador y es la zona donde se inicia el mezclado del PET con el  $O_2$ . Al final disminuye la conversión, esto debido a que ya se quemó la mayor cantidad de los reactivos. La cantidad resultante, sale mezclada con los gases en exceso en la alimentación. Esto provoca que el contacto directo PET- $O_2$  disminuya y por lo tanto la reacción térmica de conversión disminuya.



**Figura 6.** Gráfico de longitud del quemador contra avance de reacción.



**Figura 5.** a) Comparación de contornos de temperatura simulados sin radiación, b) con radiación mediante el modelo P1 y c) gráfico de longitud del quemador contra temperatura.

## CONCLUSIONES

Se llevó a cabo un estudio de la combustión de PET con  $O_2$ , acotando a cinco productos de reacción y con dos reacciones secundarias, las cuales se derivan de los productos de la reacción primaria. Se estudió el efecto de la radiación térmica generada dentro del quemador. Los modelos matemáticos utilizados para la simulación del fenómeno fueron adecuados. Se consideraron gases grises para modelar el efecto de la radiación calorífica.

La modelación de la cinética de combustión del PET fue satisfactoria, se alcanzaron temperaturas máximas de 1631 K, y la temperatura media del quemador fue de 1470 K. Las mediciones del CO y del CH<sub>4</sub> fueron muy pequeñas, al grado que se pueden despreciar, esto sucede por la generación de la reacción secundaria. Estos datos indican que se puede utilizar el PET como combustible limpio para la fundición de aluminio mediante el uso del horno de crisol que se encuentra en Taller de Metalurgia de UPJR.

La radiación fue modelada adecuadamente con el modelo P1, ya que al realizar las experimentaciones numéricas se obtuvieron valores de temperatura 50 K más alto como máximo. La mayor cantidad de radiación térmica generada fue donde se genera la mayor conversión de productos, es decir entre 0.8 m y 1.2 m, lugar donde también se alcanzaron las máximas temperaturas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Kumar, A., & Samadder, S. R. "A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. *Waste Management*", vol. 69, pp. 407–422. 2017. doi:10.1016/j.wasman.2017.08.046
2. Yang, Z., Lü, F., Zhang, H., Wang, W., Shao, L., Ye, J., & He, P. "Is Incineration the Terminator of Plastics and Microplastics? *Journal of Hazardous Materials*", 123429, 2020. doi:10.1016/j.jhazmat.2020.123429
3. Unal, N. I., Mertdinc, S., Haykiri-Acma, H., & Yaman, S. "Comparison of the fuel properties and the combustion behavior of PET bottle caps with lignite. *Energy Procedia*". Vol. 136, p. 22–26, 2017. doi:10.1016/j.egypro.2017.10.256
4. Snegirev, A.Yu., Koraiem Handawy, M., Stepanov, V.V. and Talalov, V.A. "Pyrolysis and combustion of polymer mixtures: Exploring additivity of the heat release rate. *Polymer Degradation and Stability*". Vol. 161, p. 245-259, 2019. https://doi.org/10.1016/j.polymerdegradstab.2019.01.037
5. Sovová, K., Fergus, M., Matulková, I., Španěl, P., Dryahina, K., Dvořák, O., & Civiš, S. "A study of thermal decomposition and combustion products of disposable polyethylene terephthalate (PET) plastic using high resolution fourier transform infrared spectroscopy, selected ion flow tube mass spectrometry and gas chromatography mass spectrometry". *Molecular Physics*, vol. 106(9-10), pp. 1205–1214, 2008. doi:10.1080/00268970802077876
6. Martín-Gullón, I., "Esperanza, M., & Font, R. "Kinetic model for the pyrolysis and combustion of poly(ethylene terephthalate) (PET)". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*". Vol. 58-59, p. 635–650, 2001. doi:10.1016/s0165-2370(00)00141-8
7. Escamilla-García, P. E., Camarillo-López, R. H., Carrasco-Hernández, R., Fernández-Rodríguez, E., & Legal-Hernández, J. M. "Technical and economic analysis of energy generation from waste incineration in Mexico". *Energy Strategy Reviews*, vol. 31, 100542, 2020. doi:10.1016/j.esr.2020.100542
8. Yang, Z., Lü, F., Zhang, H., Wang, W., Shao, L., Ye, J., & He, P. "Is Incineration the Terminator of Plastics and Microplastics?", *Journal of Hazardous Materials*, 123429, 2020. doi:10.1016/j.jhazmat.2020.123429
9. Yang, X., Clements, A., Szuhánszki, J., Huang, X., Farias Moguel, O., Li, J., Pourkashanian, M. "Prediction of the radiative heat transfer in small and large scale oxy-coal furnaces". *Applied Energy*, vol. 211, pp. 523–537, 2018. doi:10.1016/j.apenergy.2017.11.070
10. Yang, Z., Adeosun, A., Kumfer, B. M., & Axelbaum, R. L. "An approach to estimating flame radiation in combustion chambers containing suspended-particles". *Fuel*, Vol. 199, p. 420–429, 2017. doi:10.1016/j.fuel.2017.02.083
11. Yin, C. "On gas and particle radiation in pulverized fuel combustion furnaces". *Applied Energy*, vol. 157, pp. 554–561, 2015. doi:10.1016/j.apenergy.2015.01.142
12. Sun, Y., Zheng, S., Jiang, B., Tang, J., & Liu, F. (2019). One-dimensional P1 method for gas radiation heat transfer in spherical geometry. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 145, 118777, 2019. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118777
13. Cintolesi, C., Nilsson, H., Petronio, A., & Armenio, V. (2017). Numerical simulation of conjugate heat transfer and surface radiative heat transfer using the P1 thermal radiation model: Parametric study in benchmark cases. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 107, pp. 956–971, 2017. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.006
14. ANSYS Fluent Theory Guide, ANSYS, Inc., 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317, November 2013.
15. Movahedi, M., & Rahimi, R. (2015). Hydrodynamics of Sieve Tray Distillation Column Using CFD Simulation. *Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 49(2), 119-129
16. Yuan L., & Tang, T. (2007). Resolving the shock-induced combustion by an adaptive mesh redistribution method. *Journal of Computational Physics*, 224(2), 587–600. doi: https://doi.org/10.1016/j.jcp.2006.10.006
17. Zamora, J. M., (2015). Simulación CFD del Proceso de Combustión en un Quemador con Prerrotación. (Tesis de Licenciatura). Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid. Valladolid, España.
18. Raghieb Shakeel, M., Sanusi, Y. S., & Mokheimer, E. M. A. (2017). Numerical Modeling of Oxy-Fuel Combustion in a Model Gas Turbine Combustor: Effect of Combustion Chemistry and Radiation Model. *Energy Procedia*, 142, 1647–1652. doi:10.1016/j.egypro.2017.12.544. doi:10.1016/j.egypro.2017.12.544