

Diseño y Simulación de Sistema de Reciclaje Químico de Residuos Sólidos

Design and Simulation of a Solid Waste Chemical Recycling System

Alan Cerroblanco Ortiz, Víctor Andres Páramo Ramírez, David Aarón Rodríguez Alejandro

División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato.

a.cerroblancoortiz@ugto.mx, va.paramoramirez@ugto.mx, da.rodriguez@ugto.mx

Resumen

La mala gestión de residuos sólidos es uno de los mayores retos ambientales actuales. Esto se debe al aumento de desechos urbanos y su impacto en la contaminación del suelo y del aire. En este contexto, la conversión termoquímica mediante pirólisis surge como una alternativa sustentable para valorizar estos residuos. Este trabajo presenta el diseño y simulación de un sistema de reciclaje químico enfocado en residuos sólidos de caucho de neumáticos. El estudio se centra en la pirólisis como método de valorización y en el análisis térmico de sus componentes principales: un intercambiador de calor de tubo concéntrico (CTHE) y un reactor pirolizador. Se utilizó Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para evaluar la influencia de diferentes configuraciones de generadores de vórtices (GV) sobre la eficiencia de transferencia de calor en el condensador, comparando cuatro casos. Los resultados muestran que la disposición con GV fuera del tubo interior logró mayor reducción de temperatura del fluido caliente, favoreciendo la condensación. Además, se construyó un prototipo experimental del reactor y se realizaron mediciones termográficas para validar un modelo térmico desarrollado en ANSYS. La comparación experimental-numérica evidenció que, a pesar de limitaciones geométricas, el sistema logra una distribución térmica homogénea. El estudio contribuye al diseño y optimización de sistemas de conversión termoquímica de residuos, mejorando la eficiencia energética y apoyando la sostenibilidad mediante el aprovechamiento de subproductos pirolíticos.

Palabras clave: Reactor de conversión termoquímica; Simulación numérica.

Introducción

La contaminación ambiental ha sido una preocupación creciente a lo largo de la historia, evolucionando desde problemas localizados en el pasado hasta convertirse en una crisis global en la actualidad. El uso intensivo de combustibles fósiles ha tenido consecuencias ambientales significativas, incluyendo el cambio climático, la contaminación del aire y la degradación de ecosistemas. La biomasa es una fuente de energía renovable que se obtiene a partir de materia orgánica, como residuos agrícolas, forestales y desechos orgánicos urbanos. Su versatilidad permite su uso en la generación de electricidad, calefacción y producción de biocombustibles. Una ventaja significativa de la biomasa es su capacidad para aprovechar residuos que, de otro modo, podrían representar problemas ambientales.

En el contexto actual de crisis climática, el desarrollo de tecnologías que promuevan el uso de fuentes renovables y sostenibles de energía representa una prioridad global. La pirólisis de biomasa, como método de conversión térmica de residuos orgánicos en energía útil, surge como una alternativa viable frente al uso de combustibles fósiles. La pirólisis es un proceso termoquímico que descompone biomasa mediante la aplicación de altas temperaturas en ausencia de oxígeno. La pirólisis del caucho de neumáticos genera una mezcla de gases, líquidos y sólidos. Estos productos pueden aprovecharse como combustibles o como materias primas para otros procesos industriales.

La mejora de la transferencia de calor ayuda al medio ambiente ya que permite que los procesos industriales sean más eficientes energéticamente, lo que reduce: el consumo de combustibles fósiles, al aprovechar mejor la energía térmica, las emisiones de CO₂ y otros gases contaminantes, la cantidad de energía desperdiciada en sistemas térmicos.

El contenido de agua y oxígeno de los productos de bioaceite recolectados por condensación fraccionada se reduce drásticamente, mientras que el valor calorífico aumenta significativamente. Los componentes y propiedades fisicoquímicas de los productos en la sección de condensación a alta temperatura se acercan bastante a los de los productos petroleros existentes, que son sustitutos ideales para los futuros combustibles fósiles.

Un intercambiador más eficiente reduce la demanda de energía en sistemas de calefacción, refrigeración y generación de energía. Al mejorar la eficiencia térmica, se disminuye la carga de las bombas y ventiladores, reduciendo el consumo eléctrico en sistemas industriales. Un mejor intercambio de calor implica que se necesita menos energía para lograr la misma transferencia térmica, lo que reduce costos de operación. Se puede minimizar el uso de materiales costosos (como aleaciones avanzadas o superficies extendidas) al lograr un mejor desempeño térmico con GV. Las incrustaciones anulares reducen la sección transversal del flujo, lo que aumenta la velocidad del fluido, crean una separación en el flujo, generando vórtices secundarios detrás de cada anillo y rompen la capa límite térmica, permitiendo que el calor se transfiera más rápido desde la pared del tubo hacia el fluido [1].

El intercambiador de Calor de Tubos Concéntricos (CTHE) o doble tubo HE es el más simple en términos de diseño y costo, en el que se inserta una tubería en otra tubería y los dos fluidos tienen cada uno sus conductos de entrada y salida. Luego, el calor se transfiere del fluido caliente al fluido frío a través de la pared del tubo interior, que es la interfaz entre el anillo y el tubo [2]. Inducir el flujo de entrada de turbulencia se considera un método efectivo para el desarrollo de la transferencia de calor, que se clasifica en sistemas activos y pasivos. Los sistemas activos son las técnicas que utilizan la energía externa para mejorar la transferencia de calor, mientras que los sistemas pasivos son las técnicas que no requieren energía externa [5], [6]. Los generadores de vórtices se implementan mediante colocación de placas o aletas con inclinación dentro de intercambiadores de calor, uso de incrustaciones helicoidales o en forma de aletas dentro de tubos y diseño de obstáculos tipo delta o alas de avión en el flujo para inducir turbulencia [7], [8].

La mejora en la transferencia de calor por convección debido a los generadores de vórtices se verifica mediante simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), que permiten observar cómo los vórtices rompen la capa límite térmica, medición experimental de la temperatura y del flujo térmico en intercambiadores con y sin generadores de vórtices, el cálculo del Número de Nusselt (Nu), que indica la eficiencia de transferencia de calor por convección. Si el número aumenta, significa que hay una mejor transferencia de calor [9].

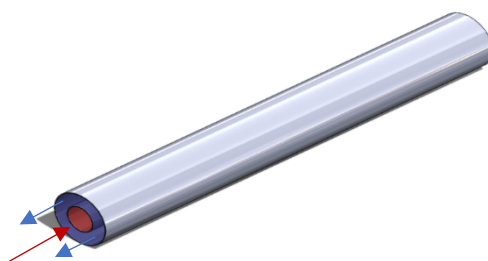


Figura 1. Intercambiador de calor de flujo contrario.
 Fuente: Elaboración propia.

A pesar del avance en modelos térmicos convencionales, existe una brecha importante en el análisis detallado de la transferencia de calor en elementos orgánicos de geometría circular expuestos a condiciones reales de operación, como las presentes en un reactor pirolizador.

Algunos estudios han intentado validar modelos numéricos con datos experimentales, pero han enfrentado dificultades para obtener mediciones detalladas dentro del lecho empacado. Gaeini et al. [9] desarrollaron un modelo bidimensional validado experimentalmente mediante imágenes de resonancia magnética (MRI), lo que permitió una mejor comprensión de la interacción entre flujo, transferencia de calor y humedad en un reactor de lecho empacado a escala de laboratorio. Sus resultados demostraron la importancia de considerar la distribución heterogénea de la humedad y el impacto del flujo en la transferencia de calor dentro del lecho. Por otro lado, Ortiz Ruiz et al. [10] contribuye a este campo al presentar una simulación numérica simplificada y transitoria en 2D de la transferencia de calor no reactiva en un reactor de pirólisis de lecho fijo a escala de

laboratorio, proporcionando información valiosa para el diseño y optimización de estos sistemas. El trabajo de Xiong et al. [11] contribuye a este campo al presentar un estudio detallado de la conducción de calor en modelos de discos bidimensionales, ofreciendo una perspectiva sobre cómo las características geométricas y las condiciones de frontera afectan el transporte térmico en sistemas reducidos. El artículo de García-Núñez et al. [12] proporciona una perspectiva detallada sobre cómo los diseños de reactores han evolucionado para satisfacer las demandas cambiantes de eficiencia y sostenibilidad en la conversión de biomasa, destacando la importancia de adaptar las tecnologías a las características específicas de las materias primas y los objetivos del proceso, de la misma manera, Ali y col. [13] desarrollar vórtices con morfología no convencional, lo cual mejora ampliamente el proceso pero limita el costo de la manufactura. Sarangi y col. [14] soportaron la argumentación del aumento sustantivo en el flujo de calor y su transferencia a través de un análisis compilatorio de las diferentes geometría utilizadas hasta el año de 2023.

Este artículo surge a partir del desarrollo de un laboratorio experimental en el área de termofluidos de la División de Ingenierías del campus Irapuato-Salamanca (DICIS), enfocado en el estudio de procesos de pirólisis aplicados a residuos de caucho. En este contexto, se identificó la necesidad de diseñar y analizar un sistema de condensación para los vapores pirolíticos generados durante el proceso, con el fin de aprovechar este residuo como fuente de energía. El objetivo principal es evaluar el comportamiento térmico de un condensador acoplado a un reactor de pirólisis, considerando parámetros como el intercambio de calor, el gradiente de temperatura y la eficiencia de condensación. Estos análisis buscan optimizar el desempeño del equipo mediante la mejora de elementos individuales, tales como el reactor y el sistema de condensación.

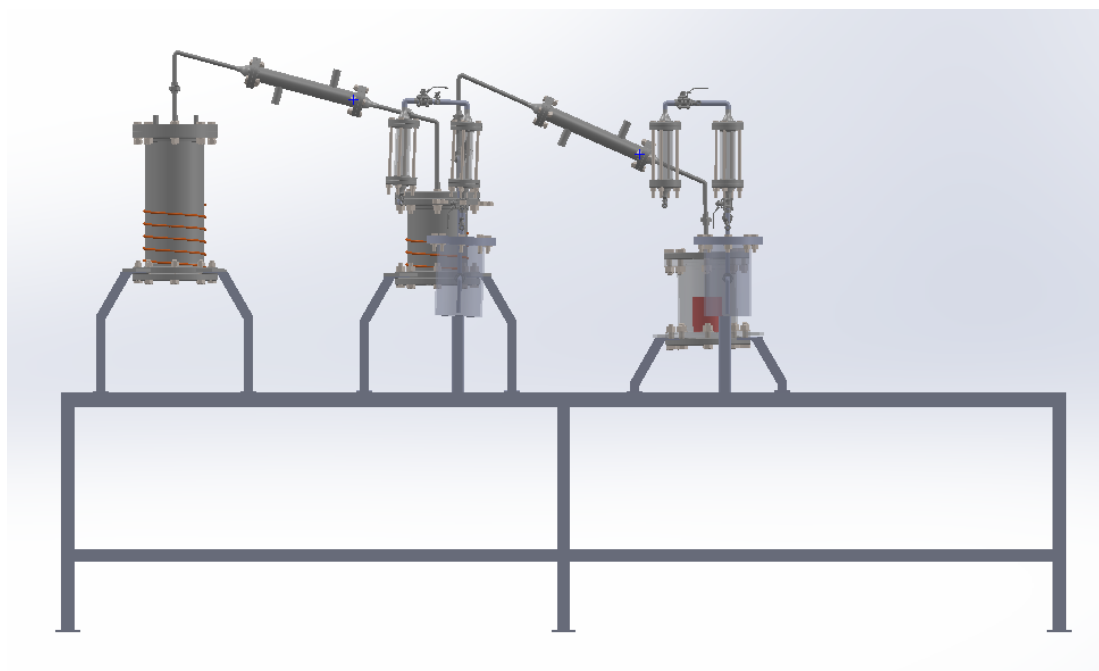


Figura 2. Sistema de pirólisis para neumáticos Usados.
Fuente: Elaboración propia.

Análisis del condensador

Con el objetivo de estudiar el comportamiento termodinámico del intercambiador tubular, se desarrollará un modelo aproximado analítico en el software EES que permite representar de forma simplificada los principales procesos de transferencia de energía y masa involucrados. El enfoque analítico proporciona expresiones matemáticas que relacionan directamente las entradas del sistema (como temperatura de entrada, velocidad inicial, flujo másico) con las salidas de interés. Esto permite realizar análisis paramétricos para identificar la influencia de distintas variables operativas sobre el desempeño del sistema, así como establecer una base para futuras optimizaciones o validaciones experimentales.

Metodología

Formulación matemática

Las ecuaciones de flujo son representaciones matemáticas utilizadas para describir el comportamiento del flujo de fluidos dentro de un sistema. Son fundamentales en la dinámica de fluidos y se utilizan para predecir cómo se mueven e interactúan los fluidos con su entorno. Para este estudio se emplearán ecuaciones de Navier-Stokes tridimensionales de estado estable de Reynolds promediadas para modelar el flujo de un fluido newtoniano incompresible. Estas ecuaciones son fundamentales para describir el comportamiento del flujo de fluido en el intercambiador de calor [15].

Ecuaciones de Continuidad y Momento

Las ecuaciones de continuidad y momento son componentes fundamentales de la dinámica de fluidos, describiendo cómo se comportan los fluidos bajo diversas condiciones. Estas ecuaciones son esenciales para analizar el flujo de fluidos en sistemas como los intercambiadores de calor [15].

- La ecuación de continuidad se basa en el principio de conservación de masas. Asegura que la masa de fluido que ingresa a un sistema es igual a la masa que lo abandona, asumiendo que no hay acumulación dentro del sistema.
- La ecuación de momento describe el movimiento de las partículas fluidas. Tiene en cuenta fuerzas como la presión, las fuerzas viscosas y externas que actúan sobre el fluido.

Modelado de turbulencia

El modelo de turbulencia $k-\omega$ se utiliza para simular el flujo turbulento dentro del intercambiador de calor. Este modelo ayuda a capturar los efectos de la turbulencia en el flujo y la transferencia de calor, lo cual es crucial para predicciones precisas en aplicaciones de ingeniería [15].

Representación de transferencia de calor

La transferencia de calor se representa a través de una ecuación que involucra la conductividad térmica efectiva y la energía total. Esta formulación es necesaria para calcular la tasa de transferencia de calor entre los fluidos calientes y fríos en el intercambiador [15].

Dominio computacional (Configuración del intercambiador de calor de tubo concéntrico (CTHE))

El dominio computacional implica un CTHE con tres disposiciones diferentes de generadores de vórtice (GV) en las paredes interna y externa. El CTHE tiene una longitud de 300 mm, un diámetro interior de 20 mm, y un diámetro exterior de 40 mm. Los VG anulares se utilizan para mejorar la transferencia de calor. Estos GV se proponen un diámetro de 4 mm, una altura de 8 mm, con un ángulo inclinado de 30 grados. El diseño y la colocación de estos GV son cruciales para generar vórtices que mejoren la mezcla de fluidos y la eficiencia de transferencia de calor.

Descripción y metodología del sistema

Se probará el efecto de los generadores de vórtice (GV) sobre la mejora de la transferencia de calor en un intercambiador de calor de tubo concéntrico (CTHE) utilizando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Se compararán cuatro casos diferentes para comprender el impacto de los VG colocados en varias ubicaciones:

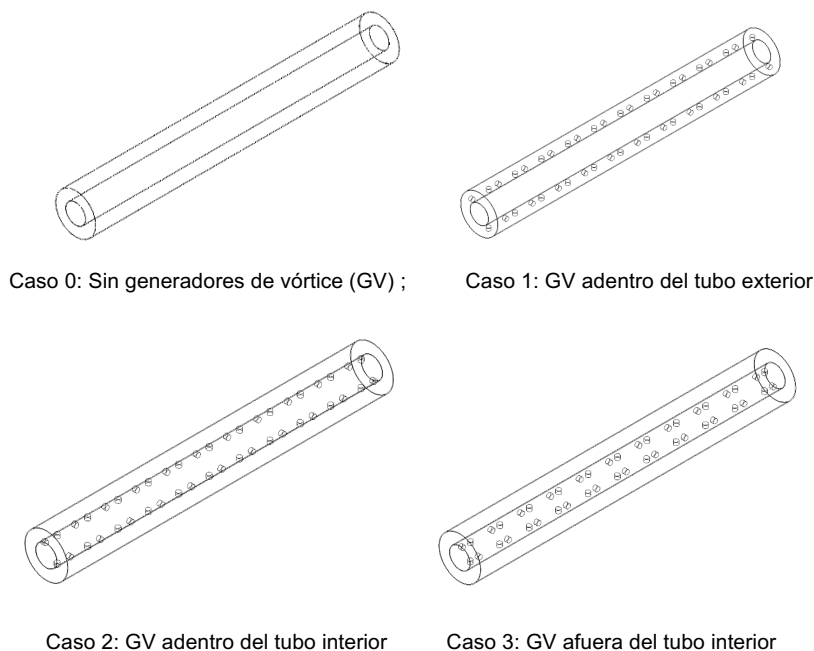


Figura 3. Casos de estudio para condensador.
Fuente: Elaboración propia.

Configuración de simulación

El estudio se centrará en un intercambiador de calor de tubo concéntrico (CTHE) donde el fluido caliente fluye a través del tubo interior y el fluido frío fluye a través del espacio anular en una disposición de contraflujo. La pared exterior del tubo es adiabática, lo que significa que tiene una condición límite de flujo de calor cero. Estas configuraciones serán parámetros comunes entre los distintos casos y simulaciones que se realizarán.

- El fluido caliente ingresa al tubo a una temperatura de 150°C (423.15 K), mientras que el fluido frío entra al espacio anular a 25°C (298.15 K). Esta diferencia de temperatura impulsa el proceso de transferencia de calor entre los dos fluidos.
- Condiciones geométricas del intercambiador de calor, así como el espaciamiento entre los GV.
- Se empleará una configuración de contraflujo, que se sabe que es más efectiva para la transferencia de calor en comparación con las disposiciones de flujo paralelo. En esta configuración, los fluidos fríos y calientes fluyen en direcciones opuestas, mejorando la eficiencia del intercambio de calor.

Como primera aproximación para observar el comportamiento del fluido, se tomó la consideración de que el fluido caliente, el que va por adentro del tubo interior, se modelaría con aire, y el fluido que se va a utilizar como refrigerante será agua a temperatura ambiente.

Tabla 1. Parámetros de la simulación.

	Temperatura de entrada	Velocidad de entrada
Fluido Frío	25 °C	3 m/s
Fluido Caliente	150°C	45 m/s

Fuente: Elaboración propia.

Para estos parámetros de entrada se aproximaron con el uso de un código creado con el software *Engineering Equation Solver (EES)* haciendo cálculos con el método de Diferencia de Temperaturas Media Logarítmica.

Resultados y discusión

Contornos de temperatura del aire

En esta sección se va a comparar los contornos de temperatura obtenidos de las distintas simulaciones, para comparar de primer vistazo cuál de las configuraciones consigue una mejor condensación del fluido caliente.

Se puede apreciar claramente cómo el mejor del caso es el 3 debido a que logra una menor temperatura como se puede ver en el plano medio como alcanza hasta una temperatura media de 376 K al final del tubo.

Estructura del flujo y contornos de temperatura

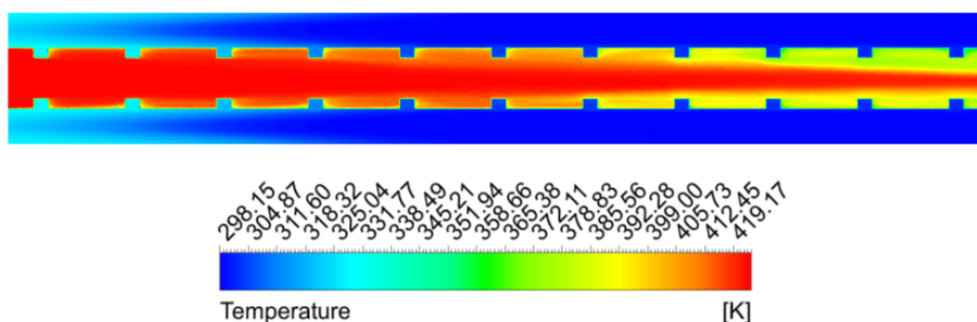


Figura 4. Vista de plano medio del intercambiador de calor, contorno de temperatura.
Fuente: Elaboración propia.

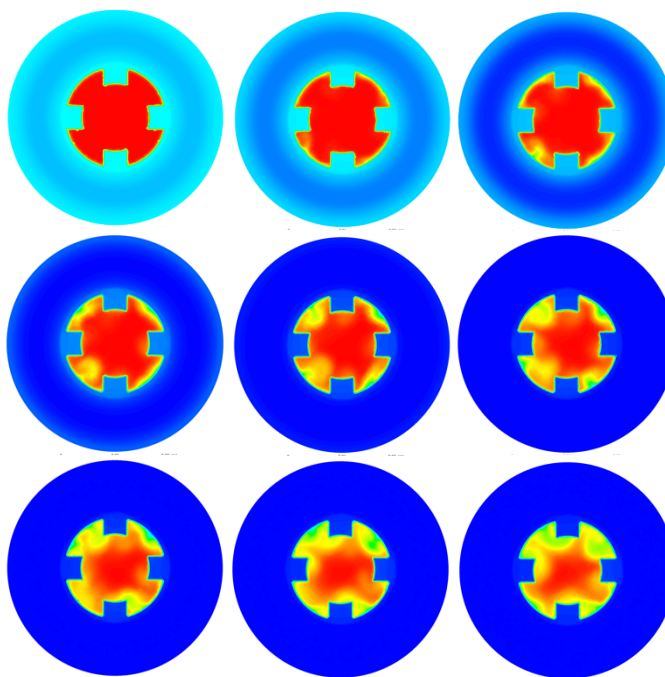


Figura 5. Planos radiales a lo largo del intercambiador de calor.
Fuente: Elaboración propia.

Aquí se realiza una comparación en los lugares donde ocurrió la mayor mejora y la menor mejora para encontrar la razón detrás de las mejoras del caso 2 ya que este consigue un mejor enfriamiento del aire caliente, además que se hizo una segunda simulación con este caso cambiando las velocidades de entrada en ambos fluidos. La comparación se realiza analizando la temperatura y el contorno del perfil de vórtices de cada caso en once planos diferentes ubicados a 10 mm y a partir de ahí se esparcen cada 28 mm (básicamente de cada fila de VGs) como se muestra en la Figura 5.

Análisis del reactor

Metodología

Obtención de imágenes termográficas del sólido circular

Esta fase tiene como objetivo registrar la distribución real de temperatura sobre la superficie de un sólido circular de acero sometido a una condición térmica controlada dentro del reactor pirolizador experimental (Figura 6), con el fin de comparar dichos datos con los resultados obtenidos por el modelo computacional basado en el Método de Elementos Finitos (MEF). Se utilizó una cámara termográfica calibrada de la marca Fluke modelo Ti450 para registrar imágenes de temperatura del sólido circular metálico mientras se somete a una fuente de calor constante y controlada a través de una resistencia térmica del reactor de pirólisis como se muestra a continuación:



Figura 6. Reactor pirolizador experimental del laboratorio de termofluidos (prototipo de banco de 2 litros de volumen) en la Universidad de Guanajuato Campus Irapuato-Salamanca.

Para este paso se colocó un disco anular de acero al carbono de 4.76 mm de espesor, 104 mm de diámetro exterior y 12.70 mm de diámetro interior como se muestra en la Figura 7.



Figura 7. Disco anular colocado dentro el reactor pirolizador.

Se suministró un flujo de calor mediante una resistencia que abraza el reactor mediante un sistema de control, el cual es el encargado de llevar las lecturas de temperatura dentro del reactor mediante un termopar. Dentro del sistema de control se estableció llegar a una temperatura de 500 °C durante 35 min.

Modelo numérico

Para modelo térmico se utilizó el software ANSYS, se consideraron propiedades homogéneas del material como la conductividad térmica, la capacidad calorífica y la densidad, (mostradas en la Tabla 2), siendo constantes y uniformes en todo el dominio del cuerpo. Este tipo de simplificación es útil para establecer un caso base que permita analizar el comportamiento general del sistema sin complicaciones adicionales.

Tabla 2. *Propiedades del acero al carbón.*

Conductividad térmica (k)	Densidad (ρ)	Calor específico (C _p)
54.1 kg/m ² K	7850 kg/m ³	501.8 J/kg K

Ecuación gobernante del modelo térmico

La distribución de temperatura dentro del disco anular se describe mediante la ecuación de conducción de calor en estado estacionario, que representa el balance energético dentro del sólido bajo condiciones sin generación interna de calor. En este caso, el modelo bidimensional considera un flujo de calor aplicado sobre la superficie exterior del disco, simulando las condiciones experimentales del reactor pirolizador.

La ecuación gobernante se expresa como (1)

$$\nabla \cdot (k \nabla T) = 0 \quad (1)$$

donde k es la conductividad térmica del material (W/m·K) y T la temperatura (K). Esta formulación permite determinar la distribución espacial de temperatura en el dominio sólido al resolver numéricamente el campo térmico en función de las propiedades del acero al carbono y las condiciones de frontera impuestas en el contorno del disco.

Resultados

Para el análisis del reactor se muestra la Figura 8 con las capturas termográficas tomadas durante la prueba experimental a distintos tiempos.

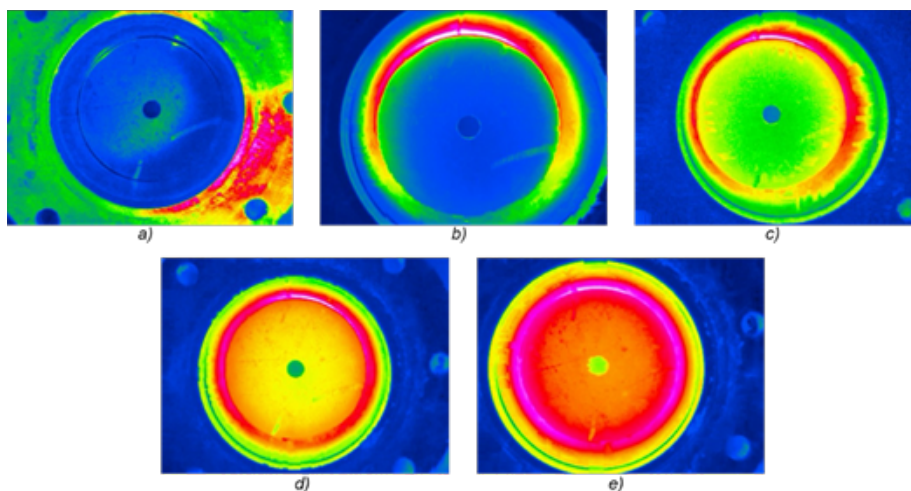


Figura 8. Capturas termográficas al tiempo de a) 0 min, b) 5 min, c) 15 min, d) 25 min y e) 35 min.

En la Tabla 3 se presentan de forma resumida los resultados de las mediciones de las temperaturas del disco anular de acero al carbono.

Tabla 3. Temperaturas de capturas termográficas al tiempo de 0, 5, 15, 25 y 35 minutos.

t [min]	t [s]	T _{placa ext} [°C]	T _{placa int} [°C]	T _{max} [°C]	T _{min} [°C]
0	0	22	22	23.8	22.1
5	300	68.9	47.8	149.4	33.3
15	900	167	123.8	317.3	29.5
25	1500	344	271.2	505.8	51.2
35	2100	544.4	406.7	634.1	100.4

Modelo numérico

En la Figura 9 se muestran los resultados obtenidos del modelo numérico con respecto a las mediciones obtenidas con las capturas termográficas que se muestran en la Tabla 3.

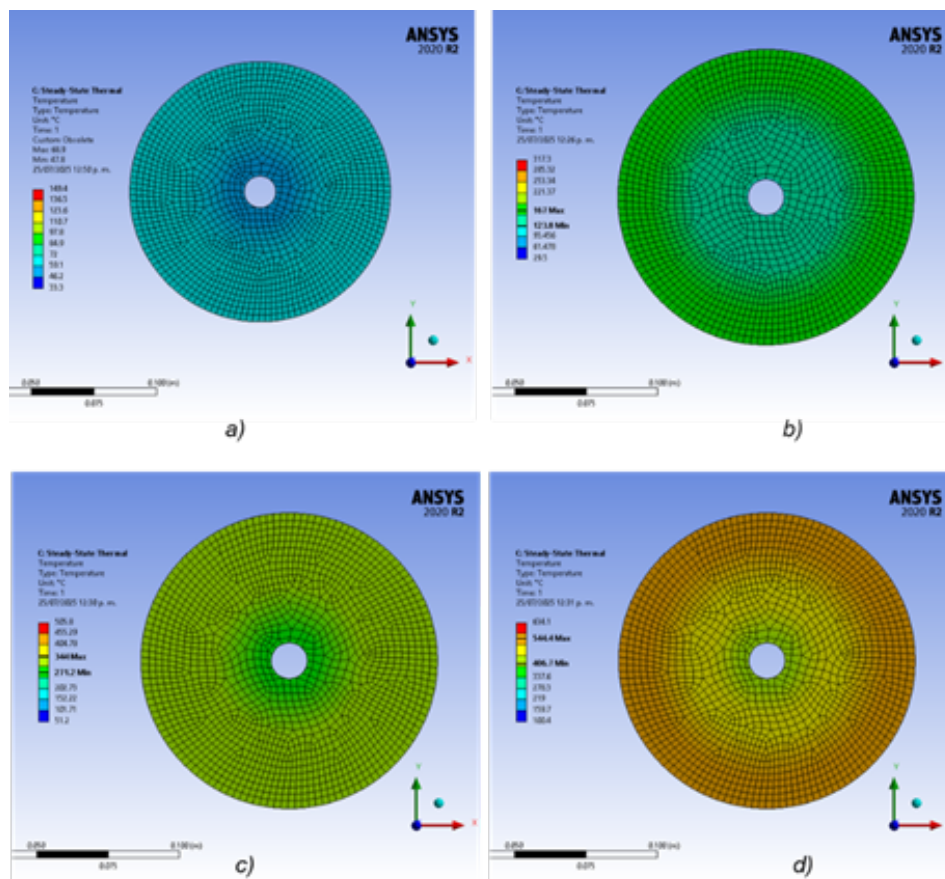


Figura 9. Simulación de la placa anular al tiempo de a) 5 min, b) 15 min, c) 25 min y d) 35 min.

Conclusiones

Como se aprecia en la Figura 9 y las capturas termográficas, la resistencia térmica colocada alrededor del reactor de pirólisis no abarca completamente la circunferencia exterior ni la altura, por lo que en pruebas experimentales este reactor tardará más tiempo en alcanzar una temperatura estable, lo que se traduce en mayor consumo energético.

Se validaron los resultados numéricos con la prueba experimental al llevar la temperatura del reactor a 500 °C. La forma de la resistencia no representa un inconveniente, ya que el reactor alcanza una temperatura uniforme en su circunferencia. Los contornos de temperatura del modelo numérico se ajustaron a las condiciones de frontera de la Tabla 2 y a los rangos de temperatura proporcionados por las capturas termográficas de la cámara Fluke Ti450.

A corto plazo, se busca optimizar el sistema de condensación para aumentar la eficiencia térmica del prototipo y mejorar la calidad de los productos pirolíticos. A largo plazo, se pretende fabricar el sistema completo de reciclaje químico en la Universidad de Guanajuato para realizar pruebas experimentales con caucho de neumáticos que no cumplen con los estándares de calidad industrial, aprovechando el convenio establecido con la empresa Pirelli. Este trabajo permitirá validar el desempeño del sistema con materiales reales, fomentar la transferencia tecnológica y fortalecer la vinculación universidad-industria en temas de sostenibilidad y economía circular.

Referencias

- [1] Fiebig, M. (1998). Vortices, generators and heat transfer. *Chemical Engineering Research and Design*, 76(2), 108–123.
- [2] Khedkar, R. S., Sonawane, S. S., & Wasewar, K. L. (2013). Water to nanofluids heat transfer in concentric tube heat exchanger: Experimental study. *Procedia Engineering*, 51, 318–323.
- [3] Khanjian, A., Habchi, C., Russeil, S., Bougeard, D., & Lemenand, T. (2018). Effect of the angle of attack of a rectangular wing on the heat transfer enhancement in channel flow at low Reynolds number. *Heat and Mass Transfer*, 54, 1441–1452.
- [4] Deng, H., Teng, J., Zhu, M., Qiang, X., Lu, S., & Jiang, Y. (2022). Overall cooling performance evaluation for film cooling with different winglet pairs vortex generators. *Applied Thermal Engineering*, 201, 117731.
- [5] Ali, S., Habchi, C., Lemenand, T., & Harion, J. L. (2019). Towards self-sustained oscillations of multiple flexible vortex generators. *Fluid Dynamics Research*, 51(2), 025507.
- [6] Ali, S., Habchi, C., Menanteau, S., Lemenand, T., & Harion, J. L. (2017). Three-dimensional numerical study of heat transfer and mixing enhancement in a circular pipe using self-sustained oscillating flexible vorticity generators. *Chemical Engineering Science*, 162, 152–174.
- [7] Lu, G., & Zhai, X. (2018). Effects of curved vortex generators on the air-side performance of fin-and-tube heat exchangers. *International Journal of Thermal Sciences*, 136, 509–518.
- [8] Lemenand, T., Habchi, C., Della Valle, D., & Peerhossaini, H. (2017). Vorticity and convective heat transfer downstream of a vortex generator. *International Journal of Thermal Sciences*, 125, 342–349.
- [9] Gaeini, M., Wind, R., Donkers, P. A. J., Zondag, H. A., & Rindt, C. C. M. (2017). Development of a validated 2D model for flow, moisture and heat transport in a packed bed reactor using MRI experiment and a lab-scale reactor setup. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 113, 1116–1129. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer>
- [10] Ortiz Ruiz, S., Gordillo, G., & Mohamad, A. A. (2019). Numerical simulation of a simplified, transient, 2D, non-reactive heat transfer model of a lab-scale fixed-bed pyrolysis reactor. *Applied Thermal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019>
- [11] Xiong, D., Wang, J., Zhang, Y., & Zhao, H. (2010). Heat conduction in two-dimensional disk models. *Physical Review E*, 82(3), 030101. <https://doi.org/10.1103/physreve.82.030101>
- [12] García-Núñez, J. A., Peláez-Samaniego, M. R., García-Pérez, M. E., Fonts, I., Abrego, J., Westerhof, R. J. M., & García-Pérez, M. (2017). Historical developments of pyrolysis reactors: A review. *Energy & Fuels*, 31(6), 5751–5775. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b00641>
- [13] Ali, S., Dbouk, T., Wang, G., Wang, D., & Drikakis, D. (2023). Advancing thermal performance through vortex generators morphing. *Scientific Reports*, 13, 368. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25516-4>
- [14] Sarangi, S. K., & Mishra, D. P. (2024). A comprehensive review on vortex generator supported heat transfer augmentation techniques in heat exchangers. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149, 7839–7867 <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13369-0>
- [15] Klein, G. N., & S., A. (2021). Introduction to engineering heat transfer. Cambridge University Press.