



# DESARROLLO DE UN MODELO NUMÉRICO PARA RECUPERADORES COMPACTOS DE CALOR APLICABLES AL SECTOR INDUSTRIAL

POR ELISEO MARTÍNEZ ESPINOSA Y WILLIAM VICENTE  
VERÓNICA BENÍTEZ (EDITÓ INFORMACIÓN)

Actualmente existe gran preocupación por la alteración del sistema climático mundial, a causa de la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI). Una meta mundial es reducir estos gases de 2008 a 2012, en poco más de 5 % en promedio respecto a los niveles que había en 1990. Existen diversos mecanismos para minimizar las emisiones de GEI, como la sustitución de combustibles fósiles por fuentes alternas de energía (solar, eólica, etc), la utilización de combustibles con nulo contenido de carbono como el hidrógeno, el desarrollo de tecnologías como la fusión nuclear o la disminución en el consumo de combustibles fósiles, mediante procesos más eficientes de generación de energía.

Una opción de impacto inmediato que no requiere cambios estructurales importantes en el sector industrial es el planteamiento de proyectos de recuperación de energía térmica. En este sentido Eliseo Martínez Espinosa —estudiante de doctorado en el II UNAM bajo la dirección del doctor William Vicente y Rodríguez— ha realizado importantes estudios para optimizar la recuperación de energía a través de intercambiadores de calor con superficies extendidas (aletas), mediante la simulación numérica de un banco de tubos con aletas helicoidales y segmentadas. El objetivo del proyecto es obtener un modelo numérico que permita analizar con detalle este tipo de equipos para maximizar el aprovechamiento de la energía residual de gases de combustión en recuperadores compactos de calor.

El presente trabajo se desarrolló porque actualmente los recuperadores de calor se diseñan bajo análisis empíricos o semiempíricos. Los análisis empíricos requieren exámenes de prueba y error para ser operados correctamente, mientras que los análisis semiempíricos sólo proporcionan información global a la entrada y salida del equipo. Este tipo de análisis no permite identificar claramente los fenómenos físicos involucrados en la transferencia de energía, porque sólo se enfoca en los efectos globales. Una alternativa viable que permite análisis detallados en recuperadores compactos de calor es la simulación numérica. Las ventajas que ofrece la simulación numérica son: identificar las variables relevantes en la transferencia de calor y en la hi-

drodinámica del flujo de gases calientes, lo que permite obtener diseños con mayor recuperación de energía a una menor caída de presión.

El análisis numérico se realizó en un banco de tubos con aletas helicoidales y segmentadas, como se muestra en la figura 1. La simulación numérica en todo el banco de tubos aletados requiere de excesivos tiempos de cálculo por sus dimensiones industriales y la cantidad de tubos. Sin embargo, el problema se puede simplificar mediante su acotación a módulos de tubos repetitivos, como el que se muestra en el recuadro de la figura 1, y con longitudes de tubos que sean independientes de los resultados. Con esta simplificación los tiempos de cálculo se reducen considerablemente, pero requieren un planteamiento especial en el modelo numérico. Este planteamiento se conoce como la implementación de condiciones de frontera periódicas.

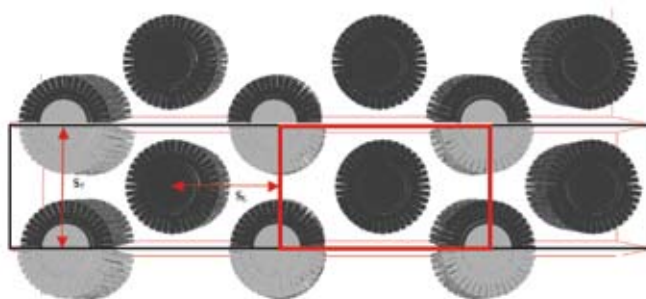


Figura 1 Banco de tubos con aletas helicoidales y segmentadas

Hay que señalar que, para la simulación numérica, se utilizaron las ecuaciones que rigen el movimiento del fluido (Navier-Stokes), así como las ecuaciones diferenciales de conservación de materia y energía. Para representar el movimiento caótico del flujo, se utilizó la alternativa de ecuaciones promediadas (Reynolds Average Navier Stokes, RANS), por lo que fue necesario usar un modelo de turbulencia; en este trabajo se

utilizó una variante del modelo k-ε estándar conocido como k-ε RNG (ReNormalization Group). Para resolver las ecuaciones anteriores, se incorporaron las condiciones de frontera periódicas de acuerdo con la metodología propuesta por Patankar, la cual se acopló a la geometría compleja de los tubos aletados. En el modelo numérico también se incorporaron el comportamiento periódico en la energía cinética turbulenta (k) y su tasa de disipación (ε), así como el efecto de los fluidos interior y exterior.

Las condiciones termodinámicas a las que se realizó la simulación numérica son las siguientes: flujo másico de  $23.21 \times 10^{-3}$  kg/s, que representa un número de Reynolds basado en el diámetro exterior del tubo de 23 696 (flujo turbulento), un número de Mach menor de 0.03 y una temperatura del flujo de aire inicial de 60°C. Por otra parte, en la simulación se utilizó un dominio de cálculo de  $0.1143 \times 0.05194 \times 0.19812$  m y una malla de 165 600 celdas. La malla anterior representó tiempos de cálculo promedio de aproximadamente 72 h por simulación. Las predicciones numéricas del campo de velocidades, presiones y temperaturas se pueden apreciar en las figuras 2b, 3a y 3b, respectivamente, donde se muestran los resultados en el plano XZ para realizar el análisis comparativo con datos experimentales. El campo experimental de velocidades se muestra en la figura 2a y el análisis comparativo de los resultados teóricos con los datos experimentales, para el campo de velocidades, en la figura 4.

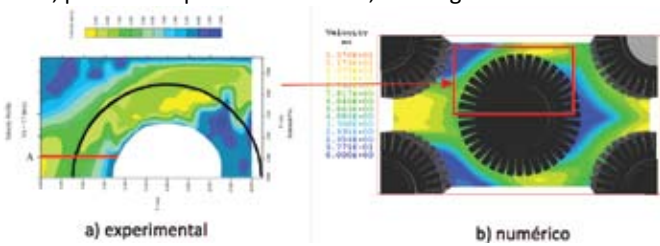


Figura 2 Perfiles de velocidades experimentales y numéricos

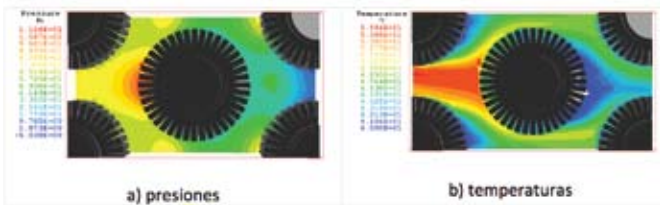


Figura 3 Perfiles numéricos de presiones y temperaturas

Los resultados muestran que las predicciones numéricas presentan desviaciones de 2.49 a 12.28 %, con desviación en un dato de 30.2 %. En lo referente a la validación del campo de presiones y temperaturas, se procedió a realizar una comparación con resultados de un análisis integral en un banco de tubos. El modelo

integral fue validado experimentalmente con datos aportados por Martínez *et al* y presenta una precisión mayor de 90 % para la presión, y mayor de 94 % para la temperatura, para números de Reynolds, con base en el diámetro exterior del tubo, mayores de 10 000. Los resultados se muestran en la tabla 1, donde existe una desviación en la caída de presión de 2.5 % con respecto al valor calculado con el modelo integral, mientras que la temperatura tiene una desviación en las temperaturas de entrada y salida de 5.7 y 4.1 %, respectivamente, con respecto al valor calculado con el modelo de cálculo integral.

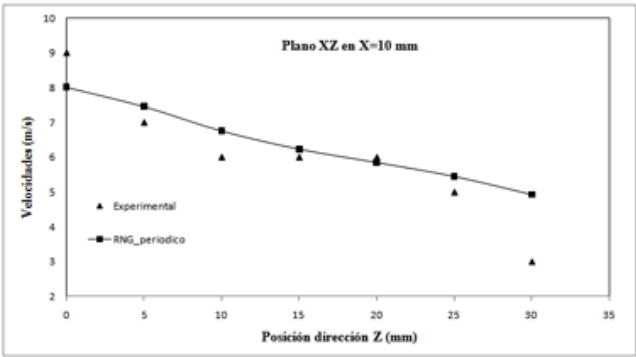


Figura 4 Análisis de precisión del campo de velocidades en plano A

TABLA 1

Variable	Simulación numérica	Modelo integral*
P <sub>entrada</sub> (Pa)	74.00	na
P <sub>salida</sub> (Pa)	11.19	na
ΔP (Pa)	62.81	64.41
T <sub>entrada</sub> (°C)	49.98	53.00
T <sub>salida</sub> (°C)	42.64	44.45
ΔT (°C)	7.34	8.55

\*Modelo Integral validado experimentalmente (Re<sub>o</sub> => 10 000):  
 94% precisión para el cálculo de las temperaturas  
 90% precisión para el cálculo de la caída de presión.

Los resultados indican que el modelo es confiable, porque las predicciones numéricas son cercanas a las experimentales. Por ejemplo, el cálculo del campo de velocidades obtenido tiene una precisión mayor de 85 % con respecto a los datos experimentales. Por otra parte, el cálculo de los valores medios de la presión muestra una precisión mayor de 97 %. Finalmente, el cálculo de las temperaturas medias tiene una precisión mayor de 94%.

El presente trabajo se desarrolló en las instalaciones del Laboratorio de Dinámica de Fluidos Computacional del Instituto de Ingeniería, con apoyo de la DGAPA, UNAM. 🏠