

ESTUDIO COMPARATIVO DE TRANSFERENCIA TÉRMICA DE TOBERA SUPERSÓNICA

Ho, Yen Kun y Scarabino, Ana

Grupo de Fluidodinámica Computacional (GFC), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Calle 116 e/ 47 y 48, 1900 La Plata, Argentina, matias.jauregulorda@ing.unlp.edu.ar

Palabras Claves: CFD, Tobera, Transferencia, Calor

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo consiste en simular numéricamente mediante fluidodinámica computacional (CFD) un ensayo experimental de transferencia de calor del aire caliente hacia la pared de una tobera supersónica, cuyos resultados fueron publicados en el trabajo “Convective heat transfer in a convergent-divergent nozzle” de L. H. Back y sus alumnos. El estudio de dicha transferencia de energía en forma de calor es una parte crítica con respecto al diseño de un motor cohete, ya que los gases calientes que fluyen en el interior de la tobera pueden alcanzar valores de temperaturas mucho más altos que las temperaturas de fusión de los materiales utilizados en su construcción. Por lo tanto, es esencial tener conocimientos del comportamiento de esta transferencia térmica para saber la cantidad de energía que se transfiere en forma de calor y estimar la distribución de temperaturas alcanzadas por los materiales. El objetivo principal de obtener estos resultados parciales es comparar los diferentes modelos numéricos y de turbulencia evaluando los más óptimos en este tipo de problemas para que los mismos sean utilizados en el proceso de diseño de un nuevo motor cohete.

En el trabajo experimental citado anteriormente, se presentaron resultados de ensayos de transferencia de calor convectiva en una tobera convergente-divergente con las paredes refrigeradas. La investigación cubrió un rango de presión de remanso desde 30 hasta 250 psia y de temperatura de remanso desde 1.030 hasta 2.000 °R. Para llevar a cabo el experimento, se calienta aire comprimido con metanol combustionado y los dos gases se mezclan uniformemente antes de entrar a la tobera. La distancia de mezclado y de combustión permite minimizar la no-uniformidad de la mezcla. Con respecto a la geometría de la tobera, esta misma tenía una garganta de 1,803 pulgadas de diámetro, una relación de contracción de área de 7,75 a 1, una relación de expansión de área de 2,68 a 1, un ángulo de convergencia de 30° y un ángulo de divergencia de 15°. El número de Mach a la salida de la tobera era aproximadamente 2,5. Finalmente, los resultados de la transferencia de calor convectiva local fueron obtenidos mediante mediciones de temperaturas en estado estacionario con termocuplas colocadas en la pared de la tobera, la que estaba refrigerada con agua. En la Figura 1 se presenta un esquema simplificado de la configuración de las instalaciones experimentales del ensayo. Vale mencionar que los efectos de radiación son despreciables en el rango de las temperaturas de remanso ensayadas. Para determinar la distribución de la presión estática a lo largo de la tobera, 32 tomas estáticas fueron colocadas circunferencial y axialmente en la pared de la tobera. Dichas presiones fueron medidas mediante manómetros de mercurio.

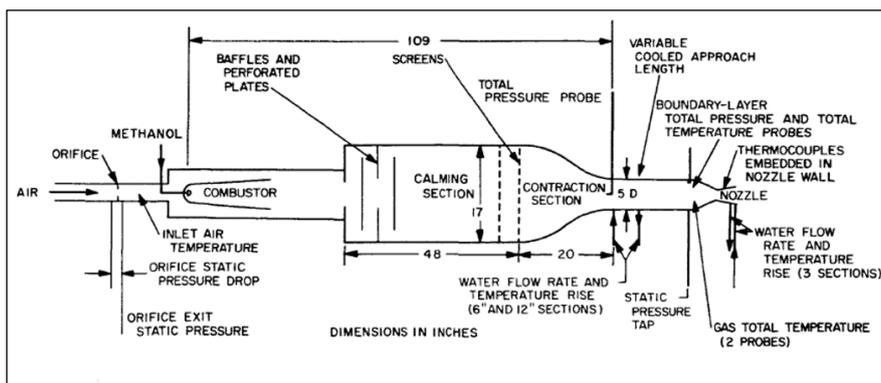


Figura 1: Diagrama del flujo y de la instrumentación del ensayo experimental

METODOLOGÍA

Las simulaciones numéricas del flujo del aire caliente que circula en el interior de la tobera fueron realizadas con el código Fluent de ANSYS. Se utilizaron solvers basado en densidad con el esquema Roe y basado en presión con el algoritmo acoplado de presión – velocidad. Las simulaciones de ambos solvers fueron realizadas con el modelo de turbulencia $k - \omega$ SST. Con respecto al flujo del aire caliente, este mismo fue simulado en régimen estacionario y compresible. La relación del flujo másico metano – aire es suficientemente pequeña, inclusive para el caso de temperatura de remanso más alta, como para que las propiedades de la mezcla tengan muy poca diferencia con las del aire. Por lo tanto, el fluido empleado en la simulación es aire. A continuación, se presentan en la Tabla 1 las propiedades más importantes de los materiales utilizados en la simulación: aire y Acero 502 para la pared de la tobera.

Aire		Acero 502 Type	
Densidad	Ecuación de gas ideal	Densidad	8030 kg/m ³
C _p	1006,43 j/kg K	Conductividad térmica	36,7 W/m K
Conductividad térmica	0,0242 W/m K	Espesor de la pared	7,4168 mm
Viscosidad	Ecuación de Sutherland; $\mu_0 = 1,716e^{-5} \text{ kg/ms}$ $T_0 = 273,11 \text{ K}$ $S = 110,56 \text{ K}$		

Tabla 1. Propiedades de los materiales utilizados en la simulación

En primer lugar, se procedió a generar la geometría de la tobera convergente – divergente utilizada en los ensayos experimentales. El modelo creado es bidimensional con simetría axial, el cual se presenta en la siguiente Figura 2.

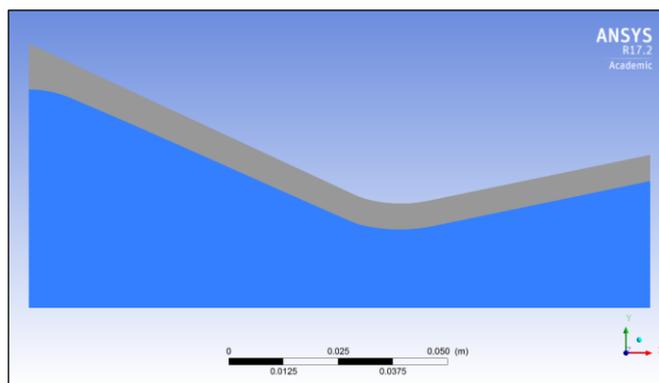


Figura 2. Geometría bidimensional axial-simétrica de la tobera

Luego de crear la geometría bidimensional, se procede a generar un mallado estructurado con densidad relativamente gruesa que tiene 5.395 elementos. Este mallado grueso (“coarse”) fue refinado varias veces en la región de la capa límite para obtener en el primer elemento un valor de y^+ que fuera adecuado (entre 1 a 5) para el modelo de turbulencia que se utilizó en las simulaciones del presente trabajo (modelo de turbulencia $k - \omega$ SST). Luego de los refinamientos mencionados, este mallado grueso pasó a tener 36.139 elementos. En la siguiente Figura 3 se muestra el mallado después de los refinamientos explicados anteriormente, con una ampliación en la región cercana de la capa límite.

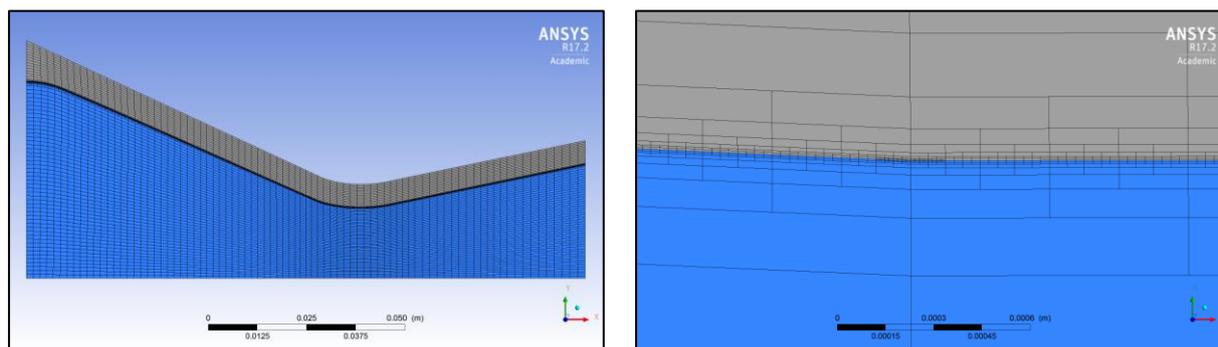


Figura 3. Mallado grueso (coarse) después de ser refinado en la región de capa límite con detalle en la garganta

A los efectos de poder realizar la simulación del flujo de aire, es necesario definir las condiciones de borde de las fronteras de la región del fluido y de la del sólido. En la siguiente Figura 4 se presenta un esquema de las condiciones de borde utilizadas en cada una de las fronteras del dominio. En la entrada del dominio se ha impuesto una condición de flujo de masa de 1,16 kg/s. En la salida del dominio de cómputo, la presión atmosférica de 101.325 Pa es impuesta como condición de borde. Luego, en la pared externa se han implementado las temperaturas aproximadamente constantes en el tiempo que fueron medidas durante el ensayo experimental realizado, las cuales se muestran en la Figura 5. Se puede observar en la Figura 4 que el dominio está dividido en 8 particiones con el objetivo de poder fijar los distintos valores de temperaturas en la pared externa. Por otro lado, en las paredes internas fue impuesta la condición de no – deslizamiento y las temperaturas fueron obtenidas de los resultados de simulación. Finalmente, en el eje central de la tobera se ha planteado la condición de simetría axial.

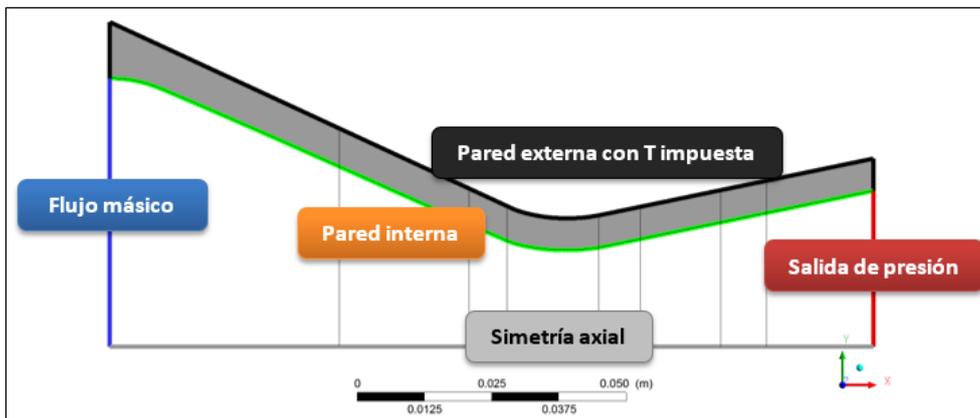


Figura 4. Esquema de las condiciones de borde

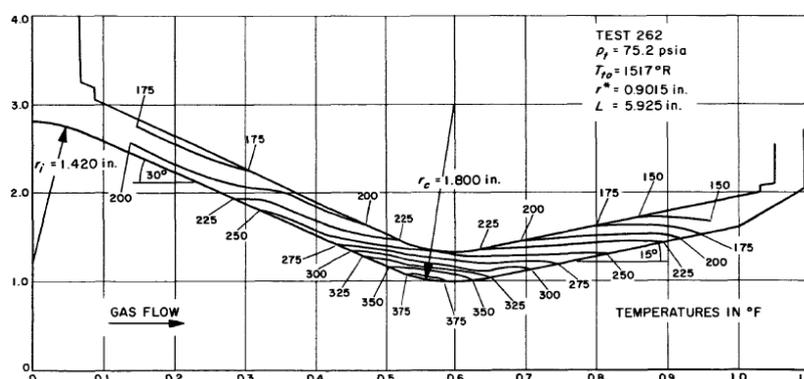


Figura 5. Curvas isotérmicas en la pared interna y externa de la tobera para el test 262

Una vez que la solución numérica convergió para el mallado grueso, se realizaron las simulaciones para un mallado con densidad mediana y fina que cuentan con 64.318 y 127.834 elementos respectivamente. El objetivo de este tipo de análisis consiste en verificar que la solución numérica sea independiente del mallado utilizado para asegurarse de que la discretización espacial sea adecuada para el tipo de problema simulado.

Para verificar dicha independencia del mallado se toman como valor de referencia el flujo de calor en la pared interna del área de la garganta. En la siguiente Tabla 2 se presentan dichos valores de referencia y sus cambios porcentuales. Se pudo verificar que los resultados numéricos están cerca de la región asintótica ya que el cambio porcentual del valor de referencia entre el mallado “medium” y el mallado “fine” es despreciable. Vale mencionar que los valores presentados en la Tabla 2 corresponden a la simulación realizada con solver basado en densidad. Para la simulación con el solver basado en presión, se utiliza directamente el mallado fino en el cual se ha verificado que la discretización espacial es correcta.

Mallado	Flujo de calor en A* (w/m2)	Cambio %
“Coarse”	576.107	-----
“Medium”	626.137	7,99
“Fine”	628.802	0,42

Tabla 2. Valor del flujo de calor en la garganta para los tres mallados

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan algunos de los resultados de la simulación numérica. En primer lugar, la Figura 6 muestra los campos de temperatura en todo el dominio de cálculo, es decir tanto en el interior como en la pared de la tobera supersónica para los dos solvers utilizados (basado en densidad y en presión). Estas imágenes permiten obtener una primera visualización de las variaciones de temperatura y una primera corroboración de los resultados en cuanto a las distribuciones de la misma.

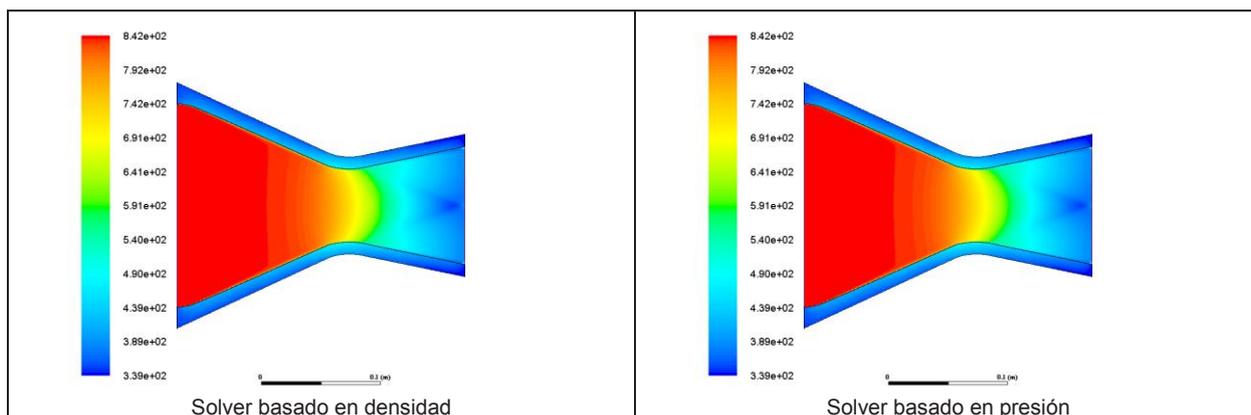


Figura 6. Contornos de temperatura en el dominio de cómputo para los dos solvers

En la Figura 7 se presentan y se comparan los valores obtenidos experimental y numéricamente de las temperaturas a lo largo de la pared interna de la tobera convergente-divergente. En líneas generales se pueden observar buenas concordancias entre los resultados de las temperaturas que se obtuvieron numérica y experimentalmente. En cuanto a las temperaturas en la pared interna, la diferencia más grande entre los estudios experimentales y la simulación numérica es menor del 10% con la excepción de la locación $z/L = 0,573$ en donde la temperatura medida arrojó un valor que parecería estar fuera del comportamiento general de la distribución de temperaturas. Finalmente, se puede observar que los resultados obtenidos con los dos solvers distintos no presentan prácticamente diferencias.

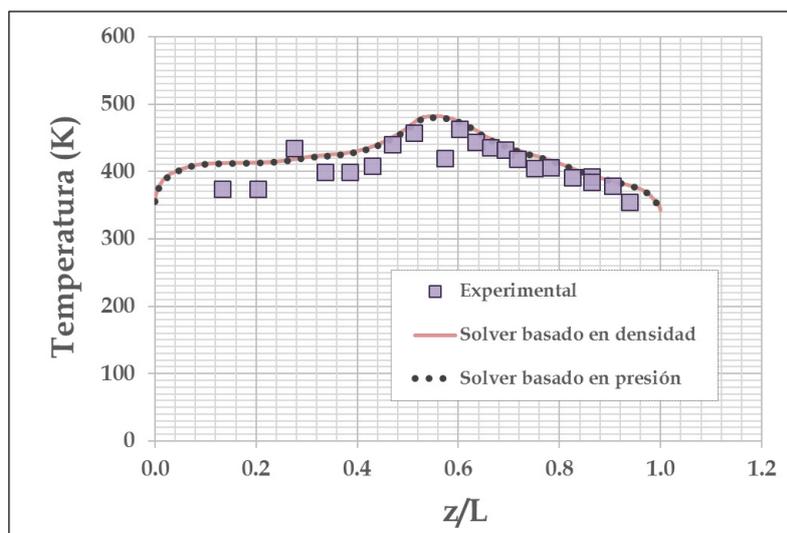


Figura 7. Comparación de resultados numéricos con experimentales (temperatura en la pared interna)

CONCLUSIONES

Las distribuciones de temperaturas en la pared interna de la tobera numéricas y experimentales fueron comparadas y se han observado buenas concordancias entre los resultados pero con una tendencia general a que la solución numérica sobreestime los valores de la temperatura en la pared interna de la tobera. Dicha sobreestimación de temperaturas se observa principalmente en la región convergente de la tobera, siendo la mayor diferencia entre los resultados numéricos y experimentales un 9,42% que tiene lugar en la estación $z/L = 0,0204$. Por lo tanto, se puede considerar que la solución numérica es válida para ser utilizada en la predicción de la distribución de temperaturas. Además, los resultados obtenidos mediante los dos solvers diferentes no presentan prácticamente diferencias. Por lo tanto, se puede concluir que tanto el solver basado en densidad como el basado en presión es válido para simular este tipo de problemas.

En esta etapa del trabajo, se realizó la simulación con dos solvers diferentes y con el mismo modelo de turbulencia, se pretende reproducir el experimento numéricamente usando otros modelos de turbulencia y tratamientos de la pared para obtener más informaciones sobre el comportamiento de estos mismos en este tipo de problemas de transferencia térmica. El objetivo es seleccionar, en base de las comparaciones de los distintos resultados numéricos, el esquema y el modelo de turbulencia más adecuado para ser usados en la predicción de la distribución de temperaturas a lo largo de la pared de la tobera. Esta predicción de valores de temperaturas es una etapa esencial en el proceso de diseño de nuevos motores para lanzadores satelitales. El objetivo final de esta línea de trabajo es tener herramientas de simulación suficientemente confiables y validadas para lograr una optimización en el diseño de forma rápida y eficiente.

BIBIOGRAFÍA

- Bacchi, F., Suarez, S., Scarabino, A., Análisis Numerico del flujo en una tobera supersónica. Primeras Jornadas de Investigación y Transferencia - Facultad de Ingeniería-UNLP. Abril 2011.
- Back, L. H., Massier, P. F., Gier, H. L., Convective Heat Transfer in a Convergent – Divergent Nozzle. International Journal of Heat and Mass Transfer. Mayo 1964.
- P. L. Roe, Characteristic based schemes for the Euler equations, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 18 337 – 365, 1986.
- F. R. Menter, Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, AIAA journal, Vol. 32, No. 8, pp. 1598 – 1605, agosto 1994.
- Ferziger J.H. y Peric M, Computational Methods for Fluid Dynamics, 3rd ed. Springer, 2002.
- Hagemann, G., Immich, H., Van Nguyen, T., Dumnov, G. E., Advanced Rocket Nozzles. Journal of Propulsion and Power, Vol. 14, No. 5, Septiembre 1998.
- Huzel, D. K., Huang, D. H., Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines. AIAA, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington, USA. 1992.
- O'Leary, R. A., Beck, J. E., Nozzle design. Rocketdyne's engineering journal of power technology, Pratt and Whitney, No. 8, 1992.
- Simmons, F. S., Rocket Exhaust Plume Phenomenology. The Aerospace Press, American Institute of Aerospace and Astronautics, 2000.
- Sutton, G. P., Biblarz, O., Rocket Propulsion Elements. John Wiley & Sons. 2001.
- Wilcox, D. C., Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries, La Cañada, USA, 2nd ed., 1998