

ANÁLISIS NUMÉRICO DEL FLUJO EN UNA TOBERA SUPERSÓNICA

Bacchi, Federico, Suarez Santiago, Scarabino Ana

UID Grupo Fluidodinámica Computacional, GFC, Depto. Aeronáutica, Facultad de Ingeniería,
Universidad Nacional de La Plata. Calle 116 e/ 47 y 48
fbacchi@ing.unlp.edu.ar

Palabras clave: expansión supersónica, CFD, tobera, pluma

Resumen

Se analiza en este trabajo en forma numérica el flujo de gases en una tobera supersónica y su descarga, expansión y mezcla en la atmósfera. Se compara la evolución dentro de la tobera de las distintas variables (presión, temperatura, número de Mach) obtenidas utilizando tres modelos de turbulencia distintos, con los resultados teóricos aproximados para flujo isoentrópico unidimensional. Se estudia el chorro de expansión y su mezcla con el aire circundante para dos casos: mismo gas (aire) con distintas temperaturas, y dos gases con distintas propiedades. Adicionalmente se analiza la generación de ruido, a partir de la distribución de potencia acústica generada en la tobera. Este análisis, llevado a cabo con un modelo axial-simétrico, permite poner a punto el dominio, el mallado, la discretización temporal y la selección de modelos de turbulencia para efectuar a posteriori un análisis 3D con un mayor nivel de complejidad.

INTRODUCCIÓN

En Ingeniería Aeronáutica y Aeroespacial son comunes los flujos a elevado número de Mach y de Reynolds, lo que implica que se deben tener en cuenta y son críticos en los resultados, tanto los efectos de compresibilidad como las características turbulentas del flujo. Desde el punto de vista numérico, la compresibilidad del flujo introduce una complejidad considerable, comparando las ecuaciones a resolver con las clásicas de flujo incompresible. Por un lado, la densidad del fluido ya no puede considerarse constante y se debe resolver, además de las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento (Navier-Stokes), la ecuación de conservación de energía y una ecuación de estado adicional, con el fin de relacionar todas las variables fluidodinámicas y termodinámicas que intervienen en el problema. Por otra parte, el carácter matemático de las ecuaciones cambia de elípticas a hiperbólicas según el flujo sea subsónico o supersónico, lo que hace que los métodos más adecuados para flujo de un tipo no necesariamente reproduzcan bien el otro y viceversa. Con respecto a los modelos de turbulencia en flujos compresibles, no se han desarrollado modelos específicos, sino que se aplican los modelos clásicos desarrollados y calibrados para flujos incompresibles, por lo que su utilización siempre conlleva un riesgo de error que demanda aún más que en los problemas tradicionales, la validación de la solución numérica contra resultados analíticos, en el caso de flujos simples, o experimentales para flujos más complejos.

La expansión del flujo en una tobera supersónica es un problema con una solución analítica conocida, aplicando un modelo de flujo unidimensional isoentrópico por un conducto de sección variable. Esa solución teórica aproximada se usó como referencia para los valores calculados en el eje de simetría, en el que la solución analítica concuerda con muy buena

aproximación con valores experimentales. En la pared de la tobera, aparecen diferencias esperables debidas a la tridimensionalidad del flujo.

El objetivo de este trabajo es poner a punto un modelo numérico capaz de reproducir aceptablemente la evolución de un flujo compresible axial-simétrico en su evolución subsónica-supersónica en una primera etapa confinada a la tobera y su posterior expansión en un entorno de presión constante, en la pluma de gas eyectado. Entre las características a optimizar del modelo, están una discretización adecuada de la capa límite y de la pluma, para capturar los elevados gradientes que se producen en estas regiones, y la selección del modelo de turbulencia que mejor se adapte al problema.

METODOLOGÍA

Se utilizó la geometría de una tobera genérica de motor cohete. Se construyó un modelo 2D axial-simétrico del, hasta 30 m de distancia de la tobera. Para el cálculo del flujo se discretizó el interior del motor, con una malla estructurada refinada en la pared. Luego de varias corridas del modelo la malla fue refinada sucesivamente hasta alcanzar los valores de y^+ en el primer elemento aceptables para cada modelo de turbulencia usado. Después de ajustes se realizó el análisis con 3 modelos de turbulencia:

- k-epsilon (Realizable)
- k-omega (SST - Shear Stress Transport)
- Spalart-Allmaras (Vorticity-Based Production)

A diferencia de los dos primeros, que modelan la turbulencia a través de dos ecuaciones adicionales de transporte, el modelo de Spalart-Allmaras utiliza sólo una, por lo que el tiempo de cómputo es menor y el modelo ha adquirido popularidad en la resolución de problemas de flujo compresible.

El análisis se realizó para un único gas perfecto, en el interior y exterior de la tobera, para poner a punto el mallado y analizar la convergencia con un problema más simple y con mayor rapidez de cálculo. Más adelante se trabajará con otra especie, hasta llegar a tener multiespecies en varias fases y simular más exactamente las condiciones del flujo de gases en la tobera y su expansión y difusión en la pluma.

Las condiciones de vuelo son a Mach 0.6 y 3000 m de altura.

Para el mallado y cálculos se utilizaron los programas Gambit y Fluent 6.3, bajo licencia del Grupo Fluidodinámica Computacional, GFC, del Departamento Aeronáutica de la Facultad de Ingeniería de la UNLP.

La figura1 muestra la malla utilizada para la discretización y cálculo del flujo. Se trata de una malla estructurada, refinada en la pared para lograr valores de coordenada adimensional (y^+) adecuados para el modelo de turbulencia empleado, permitiendo una buena resolución de la capa límite.

La variación de viscosidad con la temperatura se representa con un modelo de Sutherland de tres parámetros, obtenidos mediante ajuste de datos suministrados. En esta etapa del cálculo se consideró un valor constante para el calor específico y para la conductividad térmica del gas. En mejoras al modelo se incorporarán las variaciones de estos parámetros con la temperatura.

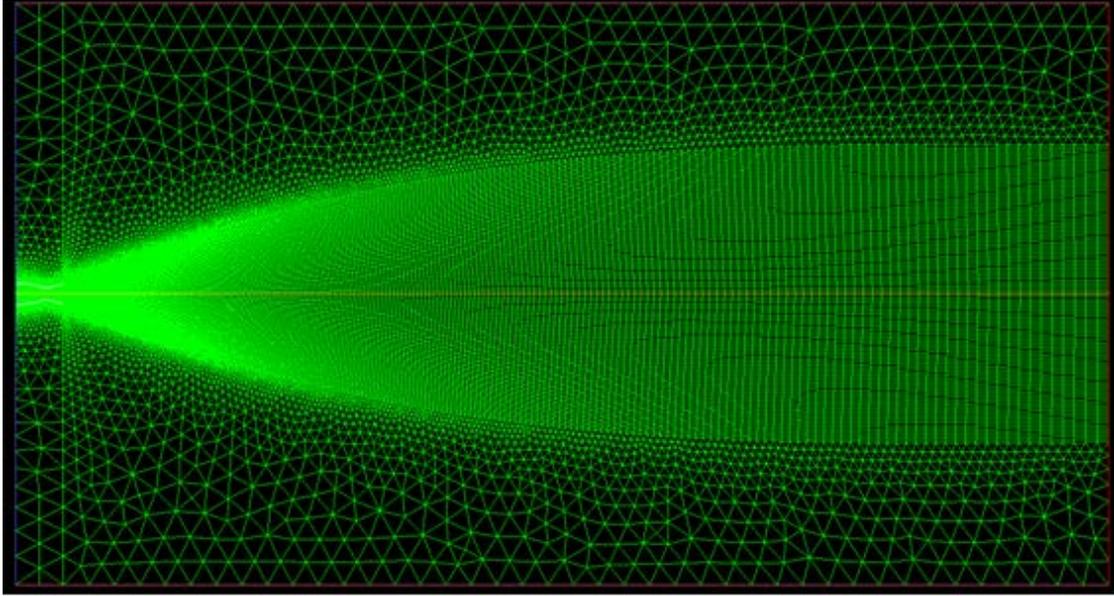


Figura 1: dominio y mallado. Puede verse la tobera en el sector izquierdo.

RESULTADOS

Eje de la tobera

Se analizaron el número de Mach y la presión y temperatura estáticas para los tres modelos de turbulencia en el eje de la tobera. Las curvas resultaron prácticamente coincidentes entre sí y con los valores teóricos, lo que demuestra la calidad del mallado y la relativa independencia del modelo de turbulencia de los resultados en la zona alejada de las paredes. La figura 2 muestra la evolución de la presión estática.

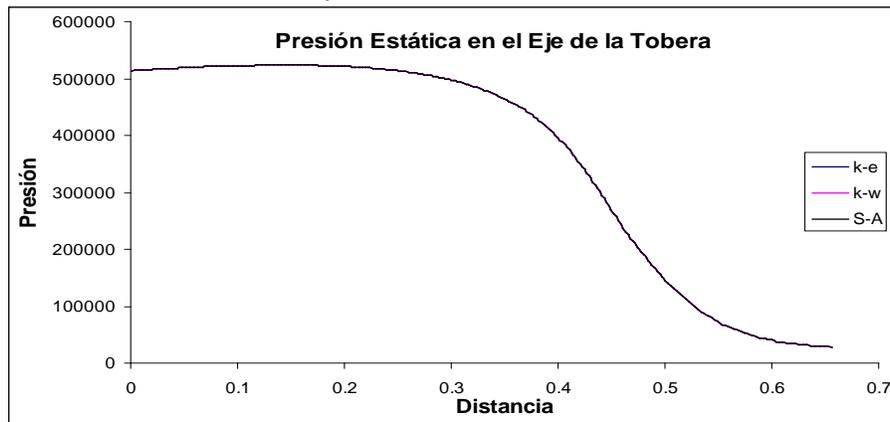


Figura 2: evolución de P sobre el eje de la tobera. La distancia es en m.

Pared de la tobera

El cambio más significativo entre los modelos se da en la pared interna de la tobera, donde se ve que el modelo Spalart-Allmaras predice un máximo de aproximadamente 2900 K, debido a un mayor volumen de gas detenido en la capa límite. La razón de estas diferencias debe ser analizada con mayor profundidad. De todos modos, se puede considerar el resultado

del modelo de Spalart-Allmaras como el más conservativo y en consecuencia, optarse por el mismo para el diseño.

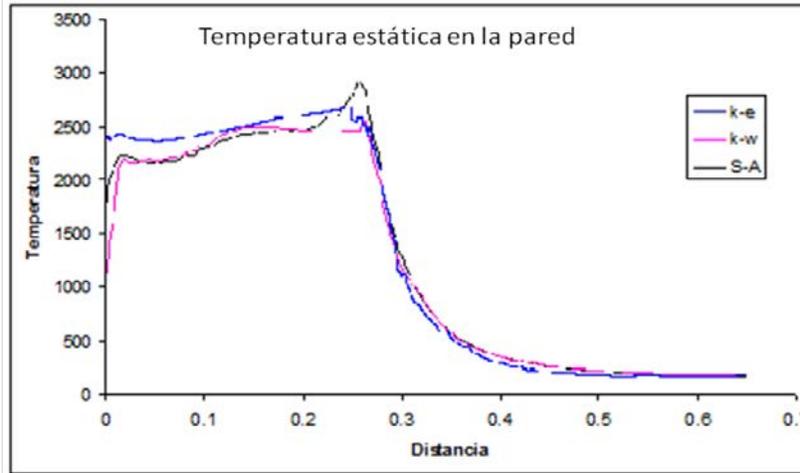


Figura 3: Distribución de temperatura sobre la pared interior de la tobera

Campo fluidodinámico

A continuación se muestran las imágenes correspondientes a la distribución del número de Mach, presión y temperatura estáticas obtenidos con el modelo de Spalart-Allmaras.

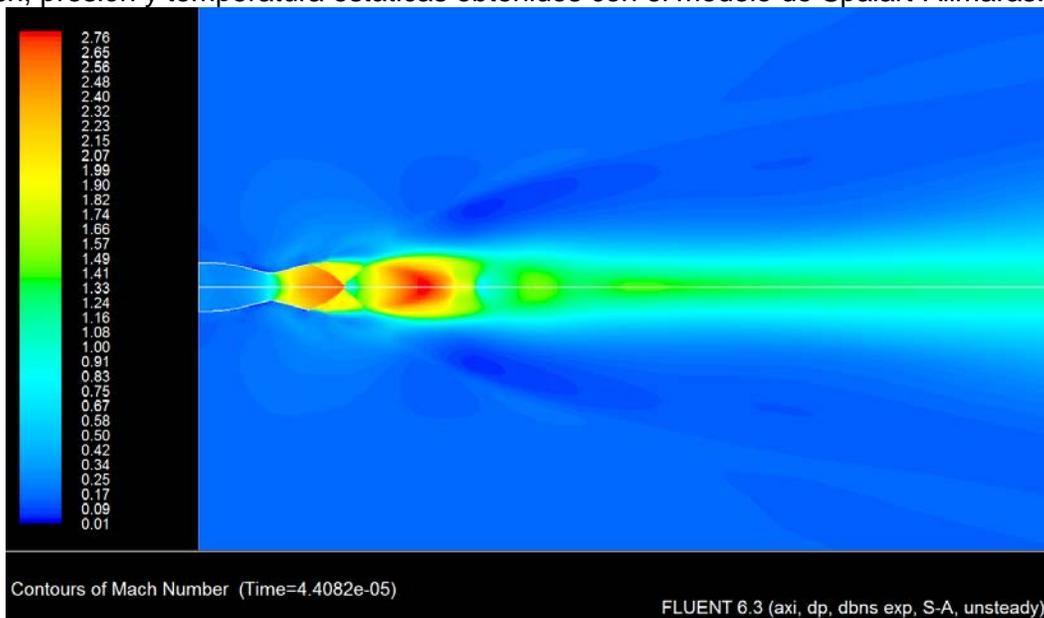


Figura 4: distribución espacial del número de Mach en la tobera y descarga

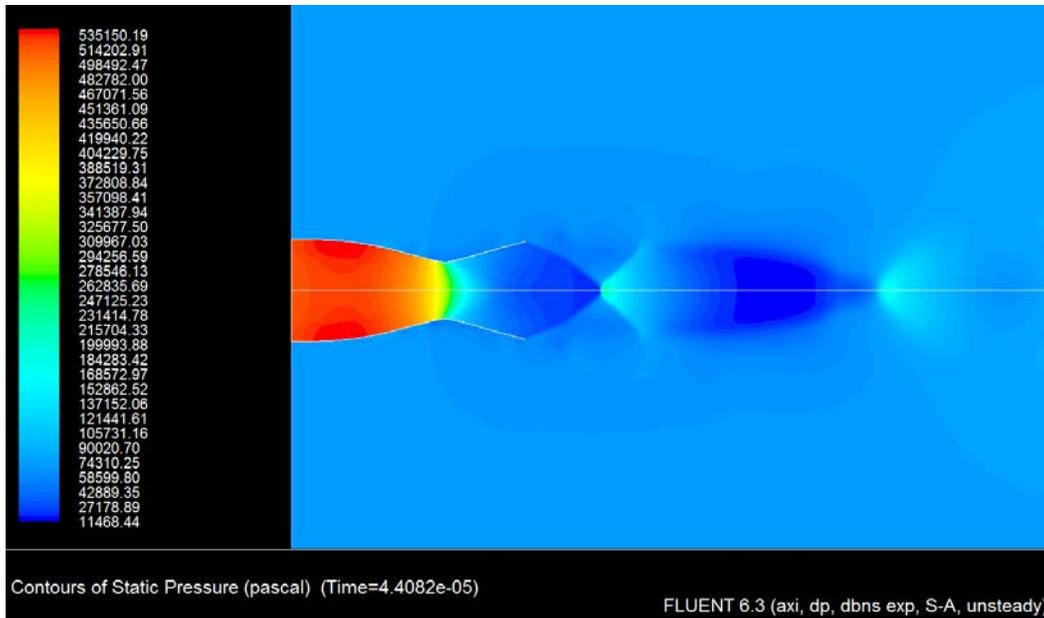


Figura 5: distribución espacial de la presión estática en la tobera y descarga

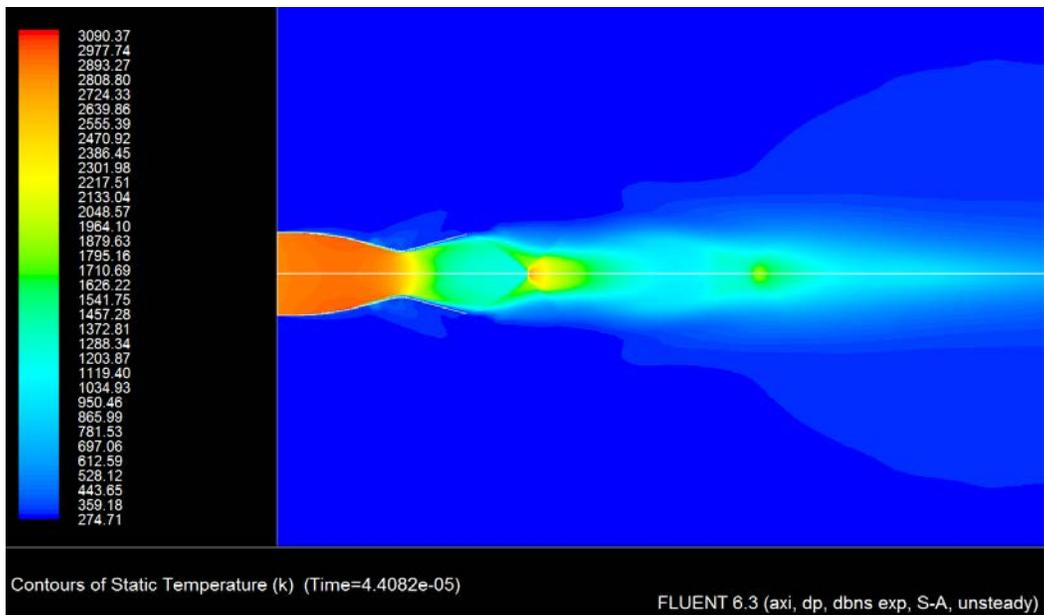


Figura 6: distribución espacial de la temperatura estática en la tobera y descarga

Se pueden visualizar claramente las dos ondas de choque normales que se forman como consecuencia de la sobreexpansión y subsiguiente compresión del chorro en la estela.

En la Figura 4 se puede observar la evolución del número de Mach. Se observa que el valor máximo se alcanza en un punto sobre el eje de la pluma, alcanzando el valor de 2.8, a una distancia de 1,5 m de la entrada a la tobera. Los campos de presión y temperatura mostrados en las figuras 5 y 6 completan la descripción del flujo, respondiendo a las importantes variaciones que se dan en las sucesivas ondas de choque y expansión. La temperatura en la pluma es elevada, alcanzando aproximadamente los 2500 K.

De forma similar a los resultados obtenidos en la tobera, sobre el eje de simetría existe una excelente concordancia entre los tres modelos de turbulencia usados.

CONCLUSIONES

Del análisis realizado, se concluye que, dada una buena discretización del dominio de cómputo, en el caso del flujo dentro y en la pluma generada por una tobera de descarga supersónica, los modelos de turbulencia $k-\epsilon$, $k-\omega$ y Spalart-Allmaras proporcionan resultados muy similares, por lo que la elección recaerá en el que demanda menos tiempo de cómputo, en este caso el de Spalart-Allmaras. Los resultados obtenidos para un flujo monofásico de un gas ideal, con las limitaciones inherentes al modelo usado, han sido concordantes con los teóricos, por lo que consideramos que el modelo numérico reproducirá confiablemente el flujo real al considerar las variaciones con la temperatura de propiedades como el calor específico y la conductividad térmica del gas. Queda por delante la puesta a punto, corrida, análisis y evaluación del estudio del flujo multifásico, en el que los gases de combustión provenientes de la tobera se mezclan con el aire de la atmósfera circundante, así como también la implementación de una simulación 3D para evaluar el comportamiento también en condiciones de vuelo con ángulo de ataque no coincide con el eje longitudinal del vehículo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca en el convenio VENG-CoNAE-Facultad de Ingeniería, para el desarrollo de un vehículo lanzador satelital.

Referencias:

- AGARD Report 819, Turbulence in Compressible Flows, 1997
- Eisfeld, B. Computation of Complex Compressible Aerodynamic Flows with a Reynolds Stress Turbulence Model, Int. Conference on Boundary and Interior Layers, BAIL 2006, Göttingen, Alemania, 2006
- Ferziger J.H. y Peric M, Computational Methods for Fluid Dynamics, 3rd ed. Springer, 2002.
- Shapiro, A. The dynamics and thermodynamics of compressible fluid flow. Ronald Press, 1953.
- Spalart, P. R., Allmaras, S. R., A one-equation turbulence model for aerodynamic flows, La Recherche Aérospatiale, 1 (1994) 5-21
- Wilcox, D. C., Turbulence Modeling for CFD, DCW Industries, La Cañada, USA, 2nd ed., 1998