

## Análisis numérico y optimización fluidodinámica de componentes de aplicación aeroespacial

F. Biaggio, F. Bacchi

Grupo Fluidodinámica Computacional, GFC, Depto. Aeronáutica, Facultad de Ingeniería,  
Universidad Nacional de La Plata. Calle 116 e/ 47 y 48

[facundobiaggio@gmail.com](mailto:facundobiaggio@gmail.com)

**Introducción.** Los conectores de las líneas umbilicales de combustible tienen como finalidad vincular la línea del lado tierra, donde se encuentran los depósitos de combustible, con la línea del lado del vehículo, donde se encuentran los depósitos de combustible del lanzador<sup>[1]</sup>.

El objetivo de este estudio es evaluar la pérdida de carga de los conectores que se van a emplear en las distintas líneas de alimentación del lanzador y, en caso de que no se satisfagan los límites impuestos por el requerimiento en ambas líneas, sugerir modificaciones de diseño pertinentes.

También se realizó el análisis y parametrización de un conjunto válvula-tobera para un motor de Vernier de gas frío de ciclo presurizado, a fin de evaluar y proponer mejoras de diseño. Este tipo de motores forman parte del sistema de control y guiado de los vehículos espaciales y permiten orientar el mismo en el espacio mediante la aplicación de empuje vectorizado<sup>[2]</sup>.

### Válvula Umbilical

**Metodología.** A partir del CAD del modelo entregado se definieron puntos de secciones en las cuales se analizaron los valores de presión del flujo, a fin de caracterizar las pérdidas de carga en relación a las geometrías de la válvula. Se consideró también para la simulación el agregado de secciones de cañería a cada lado de la válvula de un largo equivalente a 5 diámetros en la entrada y a 15 diámetros en la salida, a fin de lograr el ingreso de flujo ya desarrollado y asegurar la ausencia de recirculación en la salida del dominio.

Para la obtención de estos dominios se simplificó la geometría recibida eliminando todo aquel detalle constructivo (gaps, conexiones entre áreas que generan ángulos muy agudos, etc.) que no modifican sensiblemente el campo fluidodinámico resultante. El trabajo actual se desarrolla a partir de la evaluación de un diseño previo de válvula cuya geometría simplificada podemos observar en la siguiente figura:

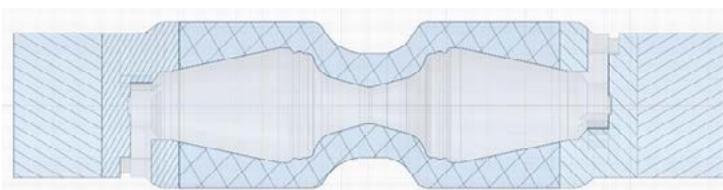


Figura 1: Sección longitudinal de volumen de simulación

Todas las mallas son del tipo híbridas, con elementos tri y quad, y la capa límite estimada en base a las características del fluido y la corriente incidente.

Un estudio de simulación previo en la mencionada geometría con resultados no satisfactorios (pérdida de presión por debajo de los requerimientos) llevó a la necesidad de proponer mejoras de diseño del cuerpo de la válvula. A estos fines se procedió a una simplificación del modelo, eliminando los soportes y permitiendo el análisis bidimensional de tipo axisimétrico. Con este modelo, la simulación de la válvula B presentó valores prácticamente idénticos de caída de presión y comportamiento que una simulación 3D, por lo que consideramos válida la simplificación del problema.

A partir de los resultados del modelo 2D, y considerando las dificultades constructivas se procedió a realizar una simulación final más precisa con la geometría ya definida.

La cantidad de elementos para la simulación final 3D de la versión C ronda los 4 millones con parámetros de calidad de malla (Skewness y Orthogonal quality) lo suficientemente debajo de los límites recomendados.

Para el análisis se consideró la siguiente configuración:

- Análisis estacionario, incompresible e isotérmico.
- Modelo de turbulencia  $k-\omega$  SST (Shear Stress Transport)
- algoritmos de discretización espacial de 2° orden upwind.
- Material: el fluido se simuló con viscosidad y densidad constante.
- Condiciones de borde de presión de entrada de operación  $P_0$  y flujo másico de acuerdo a requerimientos.

Es importante notar también que debido a que los modelos de conectores cuentan con una periodicidad geométrica de  $120^\circ$ , se simuló solo un tercio del total, a fines de reducir la cantidad total de elementos y tiempos operativos de simulación. Esto permite que en un solo corte longitudinal se observan los campos fluidodinámicos tanto detrás de los soportes de válvulas como del espacio central entre los mismos por debajo.

**Resultados.** Por motivos de confidencialidad del trabajo, los resultados se presentan de forma normalizada con respecto a variables de referencia.

Se realizaron una serie de modificaciones al diseño original, listadas en la tabla 1. Cada cambio realizado se referencia en la siguiente imagen:

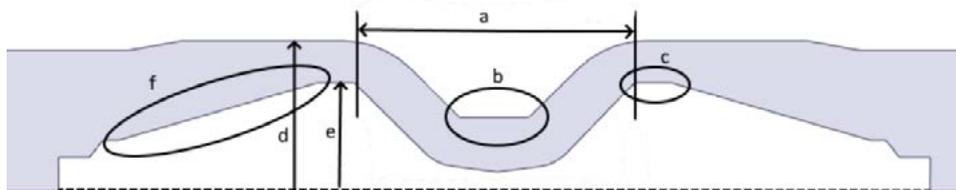


Figura 2: Parámetros geométricos modificados

El requerimiento de diseño estipulaba una caída de presión máxima  $\Delta P_{\max}$  considerando la simplificación asociada a este método de diseño así como a la simulación es preferible obtener un valor de  $\Delta P$  lo más bajo posible.

En la figura 3 podemos observar las variaciones en el campo de velocidades logradas con cada modificación a la geometría. Luego de realizar las primeras cuatro variaciones del mismo, se consultó con el diseñador de la estructura mecánica a fines de rediseñar la pieza. Estos cambios fueron descartados por no adecuarse a restricciones mecánicas de manufactura. Con nuevos parámetros de diseño agregados se procedió a probar nuevas variaciones de diseño.

Modelo	Parámetros modificados						Caída de presión (% de $\Delta P_{max}$ )
	a	b[%]	c [%]	d [%]	e [%]	f[%]	
C-I	+50%	-	-	-	-	-	94.4%
C-II	+20%	-	-	-	-	-	118.4%
C-III	-	+50%	-	-	-	-	78.4%
C-IV	-	-	-	-	-	-	82.2%
C-V	-	-	-	+ 1.6%	+ 2%	-	126%
C-VI	-	-	+20%	+ 3.2%	+ 4%	-	94.6%
C-VII	-	+5%	+20%	idem	idem	92.86	83.2%
C-VIII	-	idem	-	idem	idem	55.54	57.2%
C-IX	-	idem	-	idem	idem	idem	70.4%

Tabla 1. Modificaciones y caída de presión resultantes en análisis axisimétrico 2D.

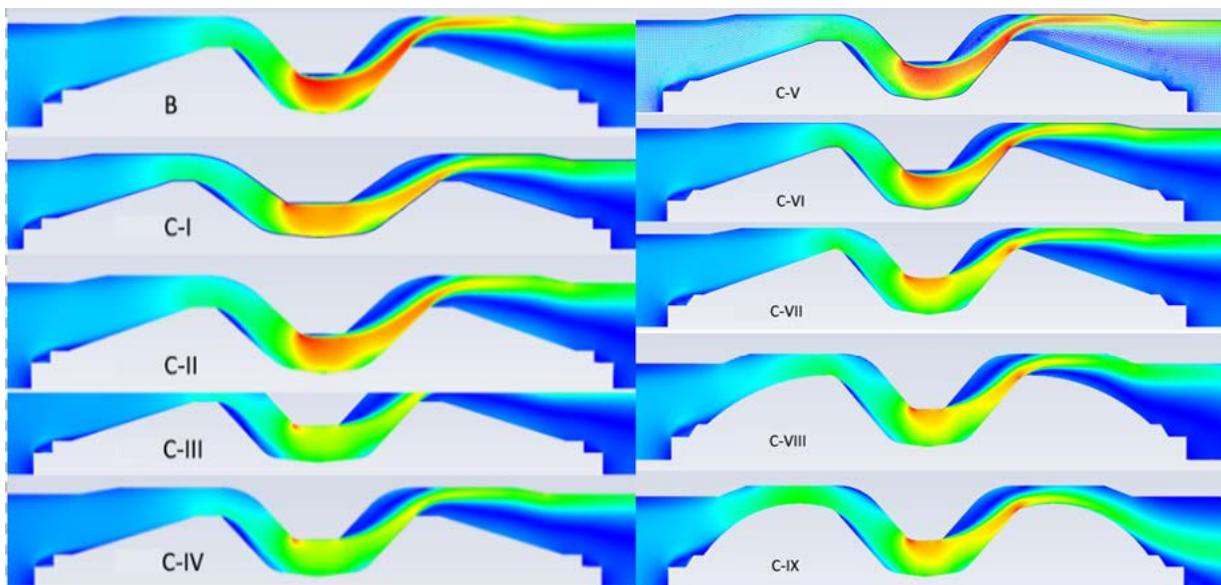


Figura 3: Campos de velocidades en la geometría original y 9 diseños modificados

La modificación de diseño clave para la reducción de pérdida de presión fue el redondeo de la sección tronco cónica de la válvula. Esto modifica principalmente la forma en la que se desarrolla la estela de la válvula, anulando prácticamente las zonas de recirculación y evitando el choque de flujo de alta velocidad relativa con la pared externa de la tubería. El principio básico detrás de esto es el efecto Coanda<sup>[3]</sup>, que establece que una corriente de fluido tiende a ser atraída por una superficie próxima a su trayectoria. La forma redondeada del cuerpo interno de la válvula evita la creación de flujos de recirculación y el desprendimiento de la capa límite. Podemos ver en un plano longitudinal la variación del campo de velocidades del flujo en el conducto, así como una distribución de las variaciones de presiones en el mismo plano.

Ya en la zona de descarga, a pesar de la velocidad con la que ingresa el flujo desde la garganta observamos que el chorro se mantiene pegado a la pared de la cápsula, ensanchándose y desprendiéndose en forma de abanico. Esta es la mayor diferencia y lo que conlleva a la notoria reducción de caída de presión de este modelo de válvula en comparación con el modelo anterior, en el cual en esta sección se producían grandes zonas de recirculación.

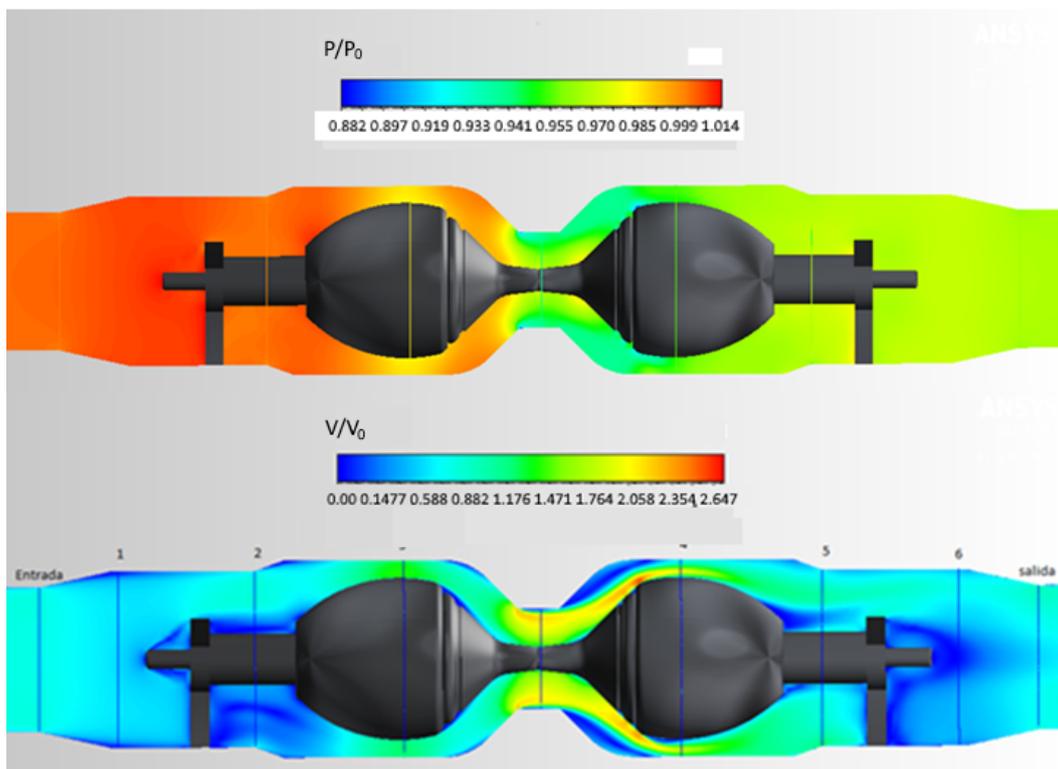


Figura 4: Contornos en plano longitudinal de presión y velocidad adimensionalizados en relación a estados de entrada.

En el pasaje entre los cuerpos de los conectores, las velocidades locales son razonables, siendo la máxima un poco menos del triple de la velocidad media de flujo en una sección de tubería de un mismo diámetro pero limpio de obstáculos. Los contornos de velocidad y presión ilustrados se encuentran normalizados en relación a la velocidad de entrada y  $P_0$ . Podemos observar también en los gráficos vectoriales, que existen zonas de recirculación de fluido, las cuales se encuentran considerablemente minimizadas en la estela del cuerpo central de la válvula.

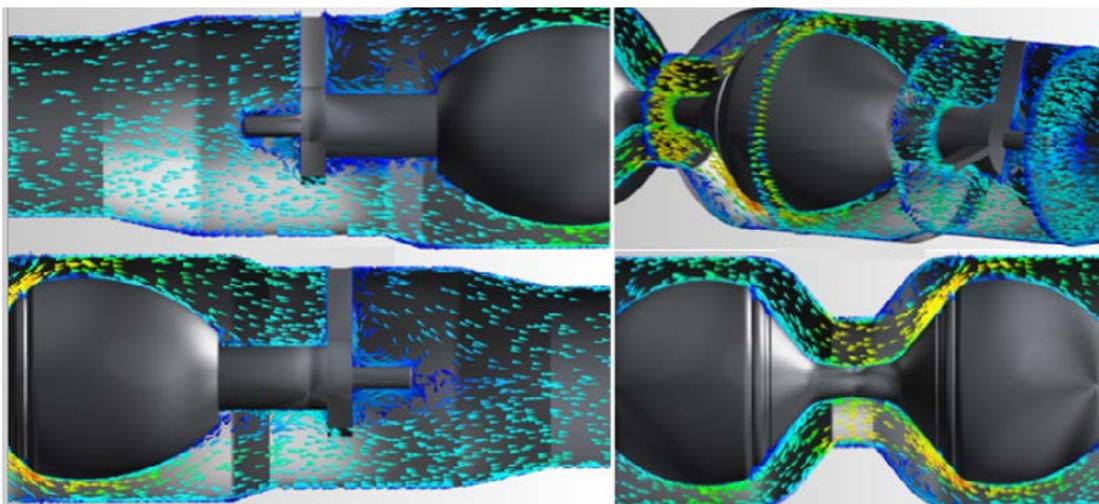


Figure 5: Zonas de recirculación

Dividiendo la válvula en secciones identificables, podemos observar la pérdida de presión relativa asociada a cada zona de la geometría de la misma:

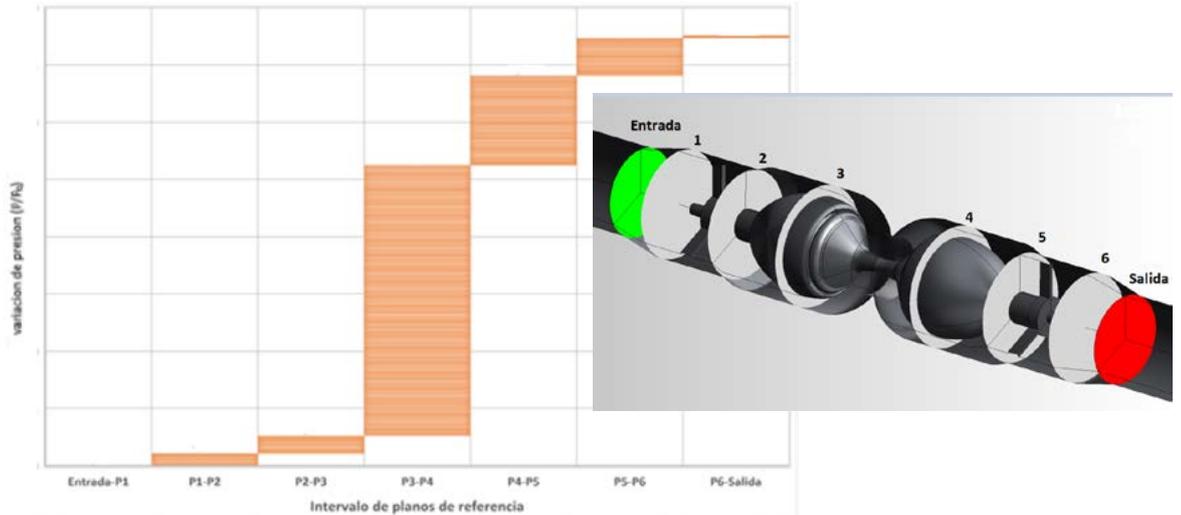


figura 6: Caídas de presión por planos de referencia y posición de los mismos

Observando también una comparación entre las caídas de presión asociadas a cada versión de diseño de la válvula:

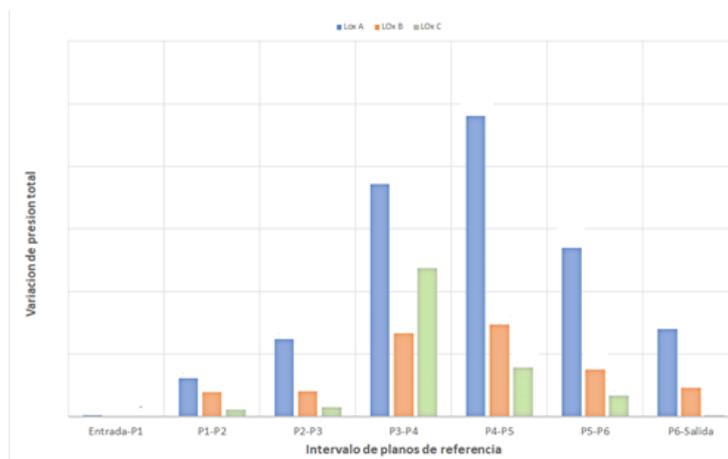


figura 7: Comparación entre caídas de presión entre modelos

### Válvula de motor Vernier

**Metodología.** Se realizó la parametrización y simulación de un conjunto de válvulas de paso y tobera de un motor Vernier de control. El mismo es un sistema de propulsión monopropelente de tanque presurizado que se utiliza a fines de orientar al cohete en ausencia de presión atmosférica. Para el análisis se consideró la siguiente configuración:

- Análisis estacionario, incompresible e isotérmico.
- modelo de turbulencia  $k-\omega$  SST (Shear Stress Transport)
- algoritmos de discretización espacial de 2° orden upwind.
- Material: el fluido es un gas con viscosidad de acuerdo a la ley de Sutherland.
- Condiciones de borde de presión de entrada de operación de  $P_0$  y flujo másico de acuerdo a requerimientos.

En principio se evaluó la válvula separada de la tobera, podemos observar su geometría en la figura N, ilustrando la entrada y cuerpo principal de la válvula a fin de verificar la pérdida de presión producto de la misma.

**Resultados.** Realizada la simulación, encontramos una presión de salida dentro de los parámetros de diseño requeridos.

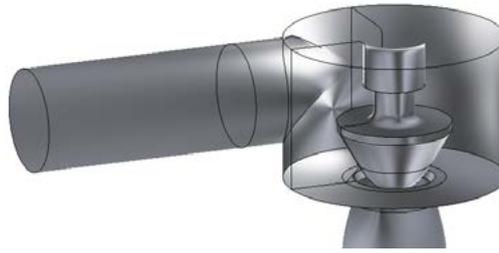


figura 8: geometría de válvula

Como podemos observar en la geometría de la válvula, el flujo de entrada a la misma entra de forma tangencial al cuerpo cilíndrico de la válvula, dado que la salida es central en la misma se genera un vórtice de fuerza considerable, como podemos observar en la visualización de el outlet:

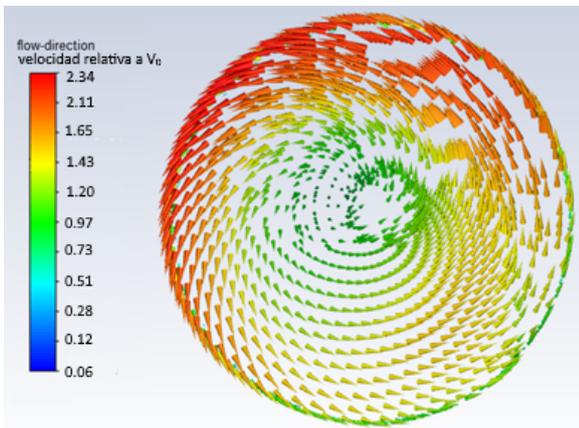


Figura 9: Vectores de velocidad tangenciales a la salida

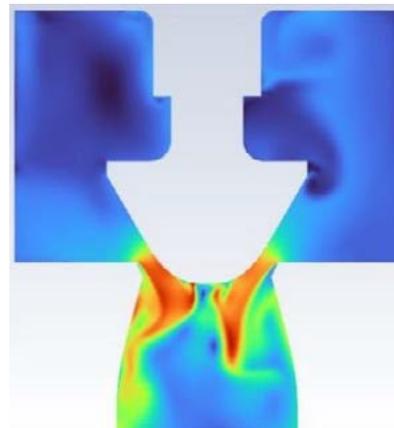


Figura 10: sección transversal salida de válvula

**Conclusiones.** Se presentan dos problemas fluidodinámicos de la ingeniería aeroespacial abordados desde la Mecánica de Fluidos Computacional. En el primer caso, los resultados permitieron mejoras de diseño que sirvieron para alcanzar los requerimientos de operación de un conector, que no se cumplían con el diseño original propuesto. En el segundo, los resultados de la simulación permitieron cuantificar y visualizar el campo rotacional de velocidades a la salida de un impulsor, paso necesario para evaluar su calidad de diseño y eficacia de funcionamiento.

En ambos problemas, el disponer de resultados de simulaciones fluidodinámicas permitió anticipar las condiciones de funcionamiento de estos dispositivos y ahorrar los tiempos y materiales que conlleva la metodología experimental de construcción y ensayos de los diseños originales previos a su rediseño.

### Bibliografía

[1]<https://youtu.be/tf7dpg9rQ4U>

[2]<https://web.archive.org/web/20110307070030/http://microgravity.grc.nasa.gov/education/rocket/rktcontrl.html>

[3]<http://www.thermofluids.co.uk/effect.php>