

Algunos aspectos de los transitorios en líneas de propulsante de vehículos espaciales

J. LOPEZ-DIEZ (*)

A. VIEDMA (*)

M. RODRIGUEZ (*)

RESUMEN. Las normas operativas para los vehículos espaciales, exigen que los sistemas de los motores orbitales y de actitud estén activados previamente a la terminación de la maniobra de inyección de órbita. Por motivos de seguridad, se llenan las líneas de propulsante con un gas inerte durante el despegue y el vuelo atmosférico, vaciándose posteriormente. Este trabajo presenta un modelo para el golpe de ariete, que puede presentarse en el proceso de llenado.

ABSTRACT. *The operational procedure for space vehicles, requires the attitude and orbital thruster control systems to be activated prior to the completion of the orbit injection manoeuvre. For safety reasons, the propellant lines are filled with inertial gas during take-off and atmospheric flight, and later evacuated. This paper presents a model for the waterhammer that may be present in the filling process.*

1. INTRODUCCION

Los procedimientos operativos aplicados en vehículos espaciales, por ejemplo en el HERMES (1), obligan a activar los motores del sistema de control de actitud y de órbita antes de finalizar la maniobra de inyección en órbita. Por razones de seguridad los conductos del sistema de alimentación de combustible están inicialmente rellenos de un gas inerte durante el despegue y la fase de vuelo atmosférico. El combustible se mantiene confinado en los depósitos mediante válvulas de aislamiento. Una vez en el espacio exterior, antes de activar los motores, es necesario proceder a eliminar el gas inerte del sistema de alimentación abriendo las válvulas de control de los motores. Cuando se completa el proceso de evacuación se cierran dichas válvulas y se abren los depósitos para llenar de combustible el sistema de alimentación.

Al alcanzar el combustible las válvulas cerradas, se produce el efecto conocido como golpe de ariete, y tiene lugar un aumento de la presión en los conductos. La existencia de gas residual en los conductos y la fricción en las paredes amortiguan la magnitud del incremento de presión.

En este trabajo se analiza una configuración característica del proceso de llenado inicial, y el esquema de las ondas generadas, identificando el conjunto de parámetros que influyen realmente en la magnitud del incremento de presión inicial. Este tipo de soluciones es útil como paso inicial de los métodos numéricos usados en el análisis de configuraciones complicadas.

El problema ha sido parcialmente investigado por Yaggy (2) en una configuración similar a la propuesta. Pero su modelo es sólo aplicable en un rango restringido de los parámetros que definen la configuración. La solución numérica del sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias que plantea proporciona resultados satisfactorios cuando, antes de la apertura de las válvulas de los depósitos, la presión en el conducto es muy alta o existe el vacío. Para valores moderados de la presión inicial las soluciones obtenidas son inconsistentes. En (2), se supone que la velocidad del fluido es uniforme en todo el conducto y se asume una distribución de presión casi estacionaria. Este modelo no permite reproducir las ondas de presión que se producen inicialmente en el líquido, que deben considerarse cuando se quiere resolver correctamente el problema para ciertos valores de los parámetros involucrados.

En el presente trabajo, se propone resolver el problema mediante el método de las características, al igual que se hace en los casos de tubo de choque (3, 4). Con la diferencia de que en un tubo de choque, un gas a alta

(*) SENER Ingeniería y Sistemas, Madrid.

(*) ETS de Ingenieros Aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid.

presión se expande ya sea en el vacío, en un líquido o en otro gas a presión muy inferior. En el caso del sistema de combustible, un líquido a alta presión es el que se expande en el vacío o en un gas a presión baja.

Desde otro punto de vista, el golpe de ariete producido cuando el frente líquido alcanza la válvula cerrada, se asemeja al caso hidráulico típico de colapso de cavidades después de producirse una separación de columna. Además, cuando en algún punto del conducto la presión es inferior a la presión de vapor, se forman burbujas en las paredes que hacen disminuir la velocidad de propagación de las ondas de presión. Este efecto es aún difícil de estimar, y es la causa principal de incertidumbre del modelo propuesto. El efecto de la formación de burbujas podría simularse como un aumento del esfuerzo cortante en la pared (5, 6). Este efecto no se tiene en cuenta en el trabajo actual, y será objeto de atención en próximos trabajos.

2. DEFINICION DEL PROBLEMA

La figura 1 es un esquema de la configuración que se va a analizar. En el instante inicial el combustible ocupa el depósito y la porción de conducción situada aguas arriba de la válvula. La porción de conducto contenida entre la válvula de apertura del depósito y válvula de control del motor (que permanece cerrada) ha sido purgada previamente, aunque se puede retener el efecto de una presión residual inicial P_0 . Los parámetros que caracterizan la configuración son la longitud de cada uno de los tramos del conducto L_1 , L_2 , la presión inicial en el depósito P_0 , y la presión residual en el conducto P_0 , y las propiedades del líquido combustible.

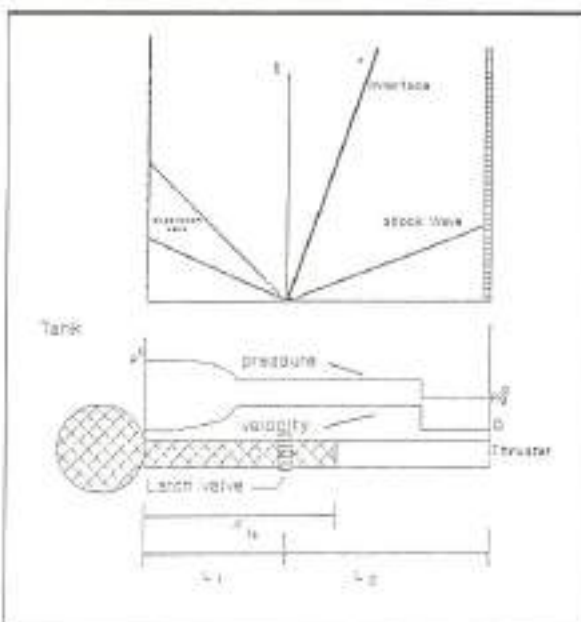


FIGURA 1. Diagrama del sistema de ondas generado y esquema de la configuración.

Al abrir repentinamente la válvula del depósito, un frente líquido avanza y se provocan ondas de compresión en el gas y ondas de expansión en el líquido que reducen la presión a la existente detrás de la onda de compresión en el gas, según se refleja en la figura 1. Como la longitud del tubo es finita, las ondas de presión se reflejan cuando alcanzan el depósito o el otro extremo del conducto. El análisis de la interacción del abanico de ondas es necesario para el máximo pico de presión que debe soportar la tubería. No se considera intercambio de calor entre los fluidos, y se supone una tubería aislada térmicamente. Se considera despreciable la solubilidad del gas en el líquido y la vaporización de éste. La velocidad de propagación de las ondas de presión en un conducto depende de la compresibilidad del líquido, el módulo de Young del material del conducto, del espesor del diámetro de éste y de la forma de anclaje del mismo (7). Una complicación adicional proviene de las variaciones del coeficiente de compresibilidad del líquido cuando existe gas disuelto en el mismo (8). Generalmente la rigidez de los conductos hace que la elasticidad se pueda despreciar y la velocidad de propagación de las ondas de presión sea igual a la velocidad del sonido en el líquido.

3. FORMULACION DEL PROBLEMA

En 1878, un artículo de Korteweg (11) demostró que el flujo no estacionario en un tubo satisface la ecuación de ondas. La corriente de líquido en el mismo formulada a lo largo de las características que da en la forma:

$$d(p + \rho u^2)/dt = \pm (f/2D)\rho u \quad \text{en} \quad dx/dt = u \pm a,$$

Para un gas la formulación según líneas características debe ser planteada con una tercera ecuación para la energía (9). La presencia de ondas de choque introduce las ecuaciones de conservación a través de las mismas (10) y se debe utilizar un procedimiento iterativo para resolver el campo fluido en su totalidad.

La presión y velocidad son continuas a través de la superficie libre: $P_1 = P_2$, y $u_1 = u_2 = u_3$.

La posición de la superficie libre está dada por:

$$dx_{fs}/dt = u_{fs}$$

Con las siguientes condiciones iniciales y restricciones:

$$\begin{aligned} t=0, x_{fs}=0, & \quad P(x < 0) = P_1, P(x > 0) = P_2 \\ x_{fs} < L_2, & \quad P(x_{fs}) = P_2 \\ x_{fs} = L_2, & \quad u_{fs} = 0 \end{aligned}$$

Y las condiciones de contorno:

$$\begin{aligned} x = -L_1, u & > 0, & P_1 + 1/2 \rho u^2 &= P_0 \\ x = -L_1, u & > 0, & P_1 &= P_0 \end{aligned}$$

Nuestro objetivo es discutir la influencia de la configuración de la línea en el aumento de presión producido por la interacción de las ondas originadas cuando el fluido impacta en la válvula cerrada. El gas residual tiene efecto amortiguador, y por tanto no modifica los

criterios de diseño buscados. Además no está normalmente presente en las líneas de propulsante de vehículos espaciales, y por tanto no se considera.

Para que el estudio tenga más generalidad, es mejor adimensionalizar la formulación. Las variables usadas se definen del siguiente modo:

$$v = u\rho a/P_0$$

$$\eta = x/L_1$$

$$\tau = t\alpha/L_1$$

$$\phi = P/P_0$$

$$\xi = x_0/L_1$$

El sistema de ecuaciones se convierte en:

$$d(\phi \pm v)/d\tau = \pm \delta v |v| \quad \text{en} \quad d\eta/d\tau = \tau v \pm 1 \\ d\xi/d\tau = \tau v$$

con las condiciones iniciales y de contorno:

$$\begin{aligned} \tau = 0, \quad \xi = 0, \quad \phi(\eta < 0) = 1, \quad \phi(\eta > 0) = 0 \\ \xi < \lambda, \quad \phi(\xi) = 0 \\ \xi = \lambda, \quad d\xi/d\tau = 0 \\ \eta = -1, \quad v > 0, \quad \phi + 1/2\tau v^2 = 1 \\ \eta = -1, \quad v < 0, \quad \phi = 1 \end{aligned}$$

Donde $\epsilon = P_0/\rho a^2$, $\lambda = L_0/L_1$ y $\delta = f L_1/2D$. El primero de estos parámetros relaciona la presión del depósito con las características del fluido, el segundo es la posición relativa de la válvula en la línea y el tercero es el efecto de la fricción.

Cuando $\xi = \lambda$ el líquido alcanza el extremo cerrado, una onda de compresión viaja aguas arriba aumentando la presión y dejando el líquido en reposo. La presión en el extremo cerrado ϕ_{rc} es una función de los parámetros λ , ϵ , δ y el tiempo adimensional τ . La magnitud importante para diseño es el máximo de este valor: $\phi_{rc}(\lambda, \epsilon, \delta)$.

4. DISCUSION Y RESULTADOS

En la mayor parte de las aplicaciones ϵ toma valores del orden de 10^{-3} , y δ del orden de 10^{-6} . El primer análisis puede ser hecho despreciando el efecto de la fricción y el cambio en la velocidad de la onda.

$$d(\phi \pm v)/d\tau = 0 \quad \text{en} \quad d\eta/d\tau = \pm 1$$

La figura 2 muestra las ondas formadas en el líquido entre la superficie libre y el depósito. Las ondas de expansión viajan hacia la izquierda, y las de compresión hacia la derecha. Cuando las ondas de compresión alcanzan la superficie libre, la velocidad de la interfase se incrementa (véase la figura 3). Por tanto, la velocidad en el momento del impacto con la válvula cerrada aumenta a medida que la relación λ es mayor. La presión adimensional ϕ depende de λ y ϵ . Más exactamente, depende de la relación λ/ϵ , y de ϵ . Para λ/ϵ muy pequeño la superficie libre alcanza la válvula cerrada antes de que la onda de compresión incremente la velocidad inicial $v = 1$, y la presión máxima obtenida ϕ_{rc} es 3, como se muestra en la esquina inferior derecha de la figura 4.

Para λ/ϵ grandes, la velocidad alcanza su máximo valor, y ϕ_{rc} es $\sqrt{2/\epsilon}$.

La presión sobre la válvula cerrada ϕ_r muestra el gran aumento inicial y la oscilación subsiguiente. A largo plazo esta oscilación se amortigua por el nivel de presión constante del depósito.

Por esto, es más conveniente, para mayor claridad, representar en la figura 4 $\phi_{rc}\sqrt{\epsilon/2}$ versus λ/ϵ , para diferentes valores de ϵ . Todas las curvas muestran una asíntota horizontal en $\phi_{rc} = 1$ cuando λ/ϵ tiende a infinito. Este límite es el que corresponde a la solución analítica para el caso incompresible. La velocidad de la superficie libre, conservando los efectos de fricción, es

$$v^2\epsilon = (1/\delta + (2 - 1/\delta)e^{-2\delta\lambda})/(1 + \lambda)$$

El límite para $\lambda \rightarrow \infty$ es $v^2\epsilon = 2 - 4\delta$.

5. SOLUCION NUMERICA

Al analizar numéricamente el transitorio provocado por el cierre repentino de una válvula se pueden considerar principalmente tres modelos con diferentes niveles de dificultad. En la figura 5 se representa esquemática-

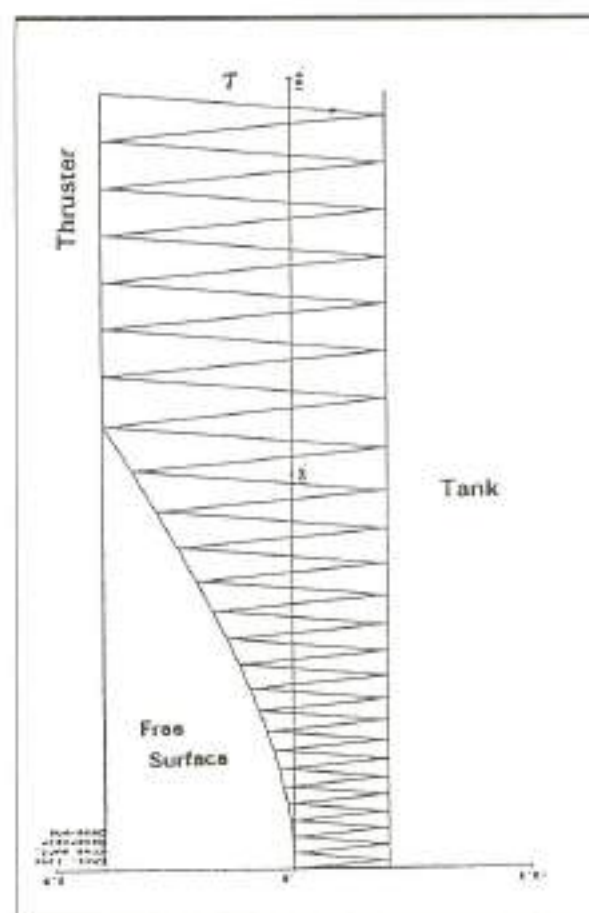


FIGURA 2. Sistema de ondas en el conducto de combustible.



Generalitat de Catalunya
**Departament de Política Territorial
i Obres Públiques**



PANTANO DE SAU

Junta d'Aigües

La Ley 17/1987, de 17 de Julio, regula el ejercicio de las competencias de la Generalitat sobre aguas y obras hidráulicas y establece la organización y funcionamiento de la administración hidráulica catalana.

De acuerdo con esta Ley, la Junta d'Aigües ejerce las competencias en materia hidráulica dentro del territorio de Catalunya, tanto en su actividad de fomento como en la de administración y tutela del dominio público hidráulico.

La Junta d'Aigües es un organismo autónomo adscrito al "Departament de Política Territorial i Obres Públiques" de la Generalitat de Catalunya, con amplia representación de los usuarios y plena autonomía funcional, que se estructura en Servicios Centrales y Territoriales, cuyos ámbitos territoriales (cuencas hidrográficas) y direcciones se indican a continuación.



SERVICIOS CENTRALES:

- | | |
|--|---------------------------------|
| 1. SERVICIO DE LAS CUENCAS DEL NORTE: | Via Layetana, 10 bis, Barcelona |
| 2. SERVICIO DE LAS CUENCAS DEL CENTRO: | Marqués de Camps, 9-10, Girona |
| 3. SERVICIO DE LAS CUENCAS DEL SUR: | Aragón, 383, Barcelona |
| 4. SERVICIO DE LA DEMARCACION DE PONIENTE: | Rambla Nueva, 50, Tarragona |
| 5. SERVICIO DE LA DEMARCACION DE LAS TIERRAS DEL EBRO: | Francesc Macià, 29, Lleida |
| | Ramón Berenguer IV, 28, Tortosa |



CAUDAL DE SOLUCIONES

Los SCADA de ENSA reúnen las características que permiten garantizar estos objetivos:

- Tecnología propia y actual con gama flexible en RTU'S y Centros de Control
- Configurabilidad, modularidad y ampliabilidad de estaciones
- Inteligencia distribuida, gran potencia de proceso
- Sistemas de comunicaciones avanzados
- Utilización de estándares: conectividad
- Fiabilidad en los elementos hardware y software del sistema
- Sistemas personalizados y llave en mano
- Asistencia técnica post-garantía



San Rafael, 4 y 6

28100 Alcobendas (Madrid)

Tel. 623 70 00

Télex 46637 EENS - E

Fax 623 72 03



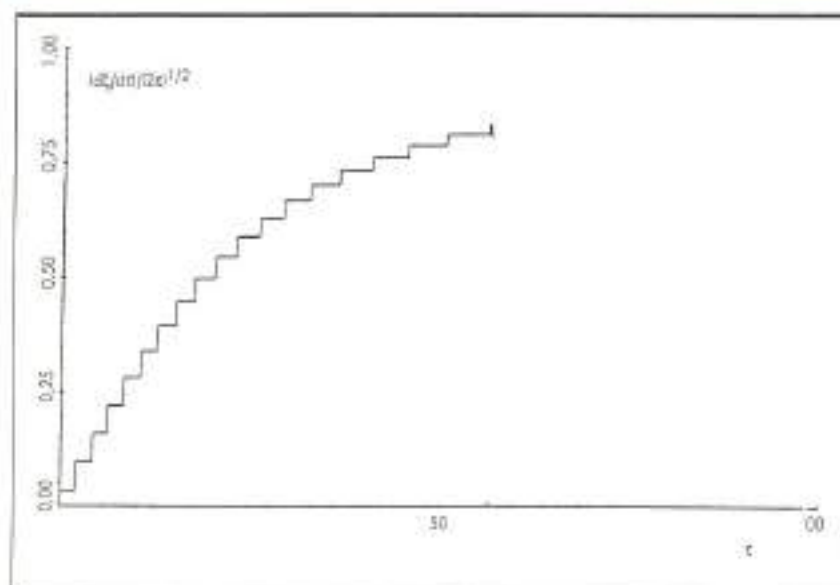


FIGURA 3. Evolución de la velocidad de la superficie libre.

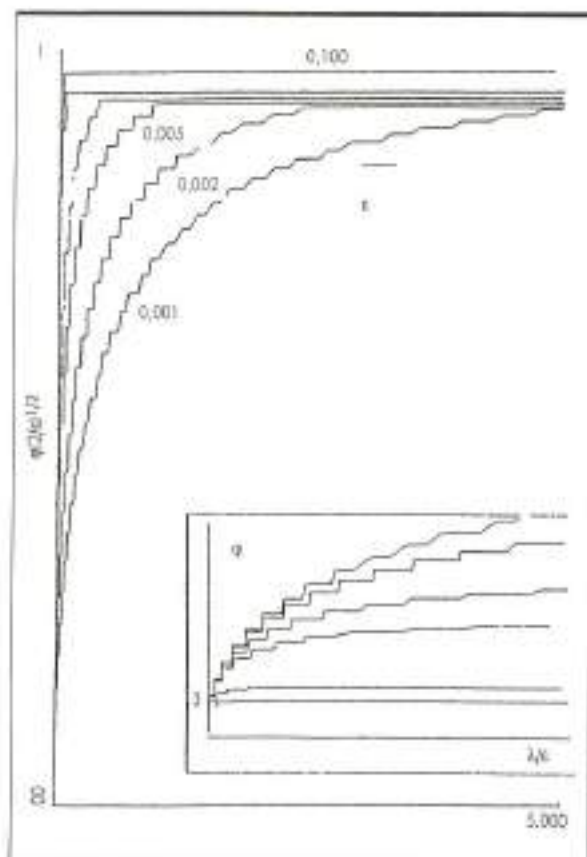


FIGURA 4. Pico de presión adimensional.

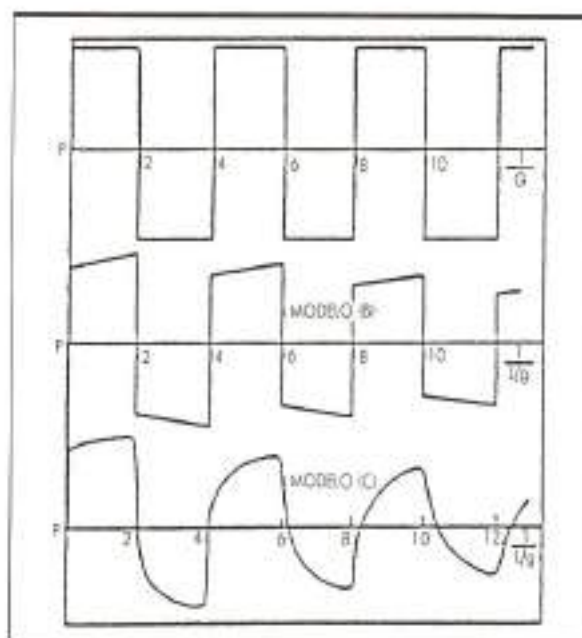


FIGURA 5. Modelos de respuesta transitoria.

mente la forma de solución proporcionada por cada modelo.

El modelo a) no considera disipación alguna, y por tanto sólo el efecto del depósito amortigua la respuesta transitoria. En el modelo b) se considera una disipación viscosa media, linealizando los efectos de fricción, y por

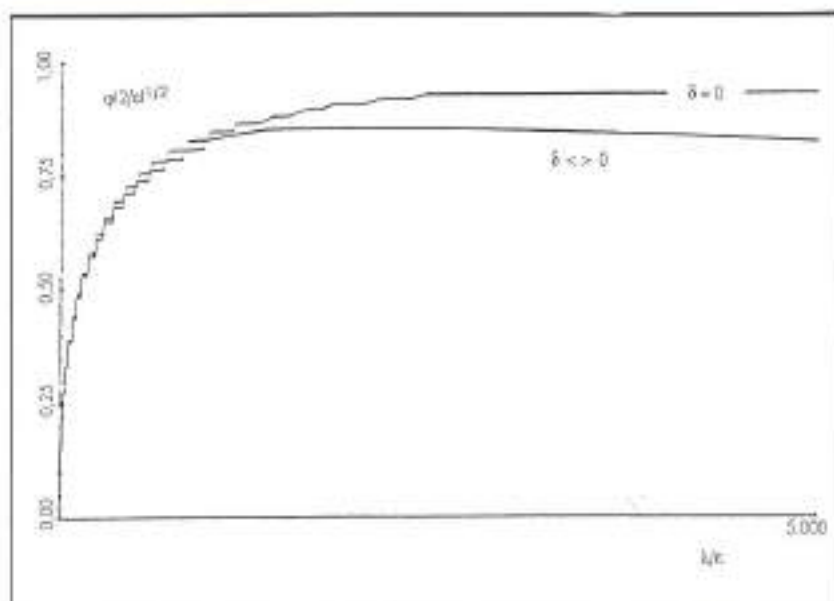


FIGURA 6. Pico de presión considerado y sin considerar a efectos de fricción.

tanto proporcional a la velocidad del fluido. En el modelo c) se incluye la fricción y efectos no lineales debidos a las ondas de presión (la velocidad del fluido modifica la velocidad de propagación de las ondas de presión). En el análisis realizado en el punto 4 se ha utilizado un modelo similar al modelo a), pero de acuerdo con (12), cuando el parámetro $4Lc/DRe$ es mayor de 0,0001 es necesario usar un modelo semejante al c). Puesto que en las aplicaciones aquí estudiadas se trabajó en este rango, se ha resuelto numéricamente el problema usando este modelo. En la figura 6 se compara la solución así obtenida con la correspondiente al análisis del punto 4. Se deduce que la complejidad del modelo no disminuye apreciablemente la máxima presión para la que se debe dimensionar el sistema de alimentación de combustible.

6. CONCLUSIONES

En este artículo se hace una formulación general del problema de llenado con combustible de una tubería. Para diseño, el pico de presión máxima sólo depende de dos parámetros dimensionales: $P_c/\rho a^2$ y $(L_c/L_1) \rho a^2/P_c$.

En el modelo numérico se conservan los efectos de fricción y variación de la velocidad de propagación de las ondas de presión. La comparación de los resultados obtenidos con el modelo lineal y numérico demuestra que en una fase de diseño preliminar se pueden despreciar los efectos de fricción y de variación de la velocidad de propagación de ondas.

REFERENCIAS

1. MBB. (1989). Definition and functional description of the HERMES Propulsion Subsystem. MBB H-AT-1H-004-MOB.
2. YAGGY, K. L. (1984). Analysis of propellant flow into evacuated lines. AIAA-84-1346.
3. GLASS, I. L. y HEUCKTOH, L. E. (1963). Hydrodynamic shock tube. The physics of fluids, vol. 6, núm. 4: 543-547.
4. AKAMATSU, T. (1977). Applications of shock tube technology to studies of hydrodynamics 11th Int. Conf. on shock tubes and waves: 24-35.
5. WYLIE, E. B., y STREETER, V. L. (1987). Fluid transients. New York: McGraw-Hill.
6. SRIDNAR, K. R.; CHAO, B. T., y SOO, S. L. (1990). Pressure drop in fully developed, duct flow of dispersed liquid-vapor mixture at zero gravity. Acta Astronautica, vol. 21, núm. 9: 617-627.
7. E.S.D.U. (1968). Item núm. 83046, Fluid Transients in pipes and tunnels.
8. WEYLER, M. E.; STREETER, V. L., y LARSEN, P. S. An investigation of the effect of cavitation bubbles on the momentum loss in transient pipe flow. J. Basic Eng. Trans. ASME 93:1-10.
9. HALOULAKOS, V. E. Wave dynamics of compressible flow networks. J. Spacecraft, vol. 18, núm. 5: 435-439.
10. SHAPIRO, A. H. (1953). The dynamics and thermodynamics of compressible fluid flow. Ronald Press Comp. New York, vol. 1: 116-122.
11. GOODSON, R. E., y LEONARD, R. G. (1972). A survey of modeling techniques for fluid line transients. J. Basic Eng. Trans. ASME 94: 474-482.
12. SAFWAT, H. H., y VAN DER POLDER, J. Experimental and analytical data correlation study of water column separation. J. Fluids Eng. ASME 95: 91-97.