

ANÁLISIS DE INESTABILIDADES FLUIDODINÁMICAS EN VEHÍCULOS ESPACIALES DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO

Leonardo J. A. Bruno, Pablo G. Hollar Dalmau, Ana E. Scarabino

Grupo de Fluidodinámica Computacional (GFC), Universidad Nacional de La Plata, Calle 116 e/ 47 y 48, 1900 La Plata, Argentina, ljabruno@gmail.com, pablohd@gmail.com

Palabras claves. pogo, vórtices, sloshing, inestabilidades, presiones.

Introducción

El análisis de los fenómenos fluidodinámicos implicados en la interacción fluido-estructural en el sistema de combustible de lanzadores es esencial para llevar a cabo un eficiente diseño de los sistemas involucrados, garantizando el correcto desempeño a lo largo de toda la misión.

En el presente trabajo se describen en forma resumida fenómenos de la dinámica del combustible en el tanque de un vehículo espacial, tales como las inestabilidades que produce el movimiento de la superficie libre del líquido en los tanques (fenómeno denominado *sloshing*), la formación de vórtices en el desalojo del combustible al pasar por la salida de tanques que puede generar mal funcionamiento de los sistemas de alimentación; y finalmente la interacción del combustible en los conductos con la estructura, ocasionando vibraciones autoexcitadas longitudinales en el lanzador cuando la frecuencia natural estructural coincide con la frecuencia natural del fluido, (fenómeno denominado *pogo*).

Desarrollo

Sloshing: El estudio dinámico del sloshing se basa en el desarrollo del campo de ecuaciones del fluido con una superficie libre (interfase líquido-gas), estimando el movimiento de la superficie libre del mismo, las fuerzas y momentos resultantes de este movimiento sobre el recipiente contenedor, pero las soluciones explícitas son posibles sólo para algunos casos particulares de geometría de contenedores. El movimiento del fluido es descrito por las ecuaciones de Navier-Stokes, pero al ser considerado el fluido incompresible y no viscoso (estos efectos pueden despreciarse en el análisis), estas se reducen a la ecuación de Euler, que en forma vectorial se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + (\bar{q} \cdot \bar{\nabla}) \bar{q} = -\frac{1}{\rho} \bar{\nabla} P - \bar{\nabla}(gZ')$$

Para la determinación de las frecuencias naturales se hace uso de la formulación variacional, teorema de Hamilton (camino de mínima energía), para de esta manera obtener una formulación linealizada del movimiento de la superficie del fluido. Así también mediante esta formulación se obtienen expresiones que permiten hallar las frecuencias naturales a partir de un método variacional aproximado. La solución está dada por

$$\omega_{mn}^2 = \left[\frac{g\xi_{mn}}{R} + \frac{\sigma\xi_{mn}^3}{\rho R^3} J_{mn} \right] \tanh\left(\frac{\xi_{mn}h}{R}\right)$$

Donde ω es la frecuencia natural, $\lambda_{mn} = \xi_{mn}/R$ son las raíces de $\frac{\partial J_{mn}(\lambda_{mn}r)}{\partial r} = 0$ y J_{mn} es la función Bessel del primer tipo de orden m .

Entonces, aplicando la última ecuación, es posible determinar los desplazamientos verticales de la superficie libre para los primeros tres modos simétricos y los primeros tres antisimétricos, aunque la aplicabilidad está limitada a oscilaciones de pequeña amplitud, ya que las ecuaciones han sido linealizadas.

La expresión matemática de la deformación de la superficie libre, para los modos simétricos resultará:

$$\eta(r, \theta, t) = \frac{1}{g} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \bar{\alpha}_{mn} \cos(m\theta) J_m(\lambda_{mn}r) \cosh(\lambda_{mn}h) \omega_{mn} \cos(\omega_{mn}t)$$

Y para los antisimétricos:

$$\eta(r, \theta, t) = \frac{1}{g} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \bar{\beta}_{mn} \sin(m\theta) J_m(\lambda_{mn}r) \cosh(\lambda_{mn}h) \omega_{mn} \cos(\omega_{mn}t)$$

De estas, interesan fundamentalmente los modos antisimétricos, que producen cargas laterales netas, y en particular el primero, que es el que da los mayores valores de fuerza resultante.

Pogo: La inestabilidad denominada *pogo* consiste en el acoplamiento de vibraciones longitudinales del fluido en los conductos de alimentación, con vibraciones mecánicas de la estructura del vehículo. Esta inestabilidad se analiza en series de tiempo de vuelo en los que se considera un modelo matemático linealizado e invariante en el tiempo, lo que permite que cada componente del sistema de propulsión (conductos, válvulas, componentes de motor, etc.) se modele dinámicamente como si el fluido estuviera quieto dentro de ellos (*"frozen flow hypothesis"*). De esta manera, un elemento será discretizado en nodos, y quedará definido cuando se apliquen las ecuaciones diferenciales a cada uno de los nodos, entonces los distintos componentes del sistema de propulsión poseerán diferentes ecuaciones que caracterizan sus comportamientos. Las ecuaciones constituyen las relaciones entre las variables de estado que incluyen perturbaciones de presión estática, las correspondientes al fluido (propelente) que son los desplazamientos relativos de masa w en los nodos y los desplazamientos absolutos generalizados de los modos estructurales q . Para determinar el modelo, se deben definir ciertos parámetros:

1. **Inertancia:** cumple la función de la masa en un sistema mecánico, y proporciona los términos inerciales en la dinámica del sistema, dado por $I = \int \frac{dl}{A(l)g}$
2. **Resistencia linealizada:** se obtiene considerando las pérdidas en el conducto debido a la fricción con las paredes, dado por $R = 2 \frac{\Delta P}{W_s}$
3. **Elasticidad:** es un parámetro que depende de la velocidad de propagación de una onda de presión en el conducto. A medida que el conducto se considera menos rígido; este parámetro disminuye.

Por lo que partiendo de la ecuación unidimensional de cantidad de movimiento de un fluido:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{g}{\rho A} F_F + \frac{g}{\rho A} F_B = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{g}{\rho A} \vec{F}$$

Y linealizando a cada nodo, en este caso y como ejemplo, de un elemento “caño”, se llega a que en cada elemento se tiene una ecuación representativa de su dinámica en los extremos (subíndices i y j):

$$\begin{cases} \frac{I}{2} \ddot{w}_i + \frac{R}{2} \dot{w}_i + K_a w_i - K_a w_j - p_i + \rho \vec{H}_i \cdot \ddot{\vec{r}} = 0 \\ \frac{I}{2} \ddot{w}_j + \frac{R}{2} \dot{w}_j + K_a w_j - K_a w_i + p_j + \rho \vec{H}_j \cdot \ddot{\vec{r}} = 0 \end{cases}$$

Asimismo puede construirse la ecuación de otros elementos en el lanzador, dado por:

Tanque	$I_t \ddot{w}_i + R_t \dot{w}_i - \sum_n \beta_{ni} \ddot{q} + p_i = 0$
Junta	$p_i = p_j = p_k$ $w_i = w_j + w_k$
Cámara de combustión	$\begin{cases} I_i \ddot{w}_i + R_i \dot{w}_i - p_i + p_l + \eta p_m = 0 \\ I_j \ddot{w}_j + R_j \dot{w}_j - p_j + \eta p_l + p_m = 0 \\ R_{ci} \dot{w}_i - p_l - \tau_c \dot{p}_l = 0 \\ R_{cj} \dot{w}_j - p_m - \tau_c \dot{p}_m = 0 \\ p_k - p_l - p_m = 0 \end{cases}$

Los valores de los modos de vibrar del sistema de propulsión deben ser comparados con los modos de vibrar estructurales, para conocer los modos de vibrar oscilatorios que podrían causar pogo.

Vórtices de descarga: la dinámica de acción de un vórtice en un tanque de propelente ocurriendo en respuesta a una perturbación externa, está basada en el teorema de Kelvin de la conservación de la circulación para un fluido no viscoso e incompresible.

Cuando el fluido se mueve en un tubo cilíndrico, los vórtices inicialmente presentes, solo aparecen “copiando” el movimiento de la parte superior del tanque. Sin embargo, si la estructura vorticosa se ve forzada a adquirir un radio de menor tamaño (como sucede al ingresar en la descarga), la conservación de cantidad de movimiento exigirá un aumento de la velocidad de rotación para mantener el momento angular constante. Esto explica el aumento de velocidad angular que experimenta el fluido al llegar a la salida reducida del tanque.

Podemos diferenciar dos tipos de vórtices distintos, o cuales se desarrollan a continuación:

Vórtice forzado: La rotación de un fluido que se mueve como un sólido respecto a un eje se denomina movimiento de vórtice forzado. En este caso, cada partícula de fluido tiene la misma velocidad angular.

En este tipo de vórtices no existen esfuerzos cortantes en el líquido, y la única aceleración que ocurre se dirige radialmente hacia adentro, hacia el eje de rotación. El fluido rota como un cuerpo sólido.

El flujo en un vórtice forzado es rotacional.

Vórtice libre: El vórtice libre es uno de los tipos elementales de flujo irrotacional. Este movimiento se distingue del vórtice forzado ya que cada partícula se mueve en una trayectoria circular a una velocidad que varía inversamente proporcional con la distancia al centro de rotación. El flujo en un vórtice libre es irrotacional.

Normalmente la configuración de un vórtice incluye un núcleo rotacional y un campo irrotacional, por lo tanto tenemos:

$$V_{\theta} = \begin{cases} \omega \cdot r & \text{si } r < a \text{ (vórtice forzado - flujo rotacional)} \\ \frac{cte}{r} & \text{si } r > a \text{ (vórtice libre - flujo irrotacional)} \end{cases}$$

La aceleración del fluido al disminuir el radio de la zona irrotacional produce una caída de presión y la deformación de la superficie libre del líquido, que desciende hacia el centro del vórtice. En casos extremos, este descenso alcanza la descarga y la superficie libre se “rompe” en el centro, permitiendo el ingreso de gas o vapor en la línea de alimentación (“vórtice de la bañera”). Esto resulta enormemente perjudicial para el normal funcionamiento del motor, que puede incluso apagarse por la interrupción momentánea del flujo de combustible.

Resultados y discusión

A través de los modelos creados se pudieron obtener y comparar los principales parámetros que caracterizan el desarrollo del fenómeno en los sistemas de almacenamiento y transporte de combustible de vehículos espaciales y proponer soluciones adecuadas para prevenir cada uno de estos fenómenos. Como ejemplo de los distintos problemas analizados, se presentan a continuación la deformación de la superficie libre para los primeros modos de vibrar en la aproximación lineal, en contraste con una simulación numérica computacional del fenómeno de sloshing en un tanque de combustible tipo, y las frecuencias de vibración de los sistemas de alimentación de fluido en sus distintos modos y las frecuencias estructurales de los modos longitudinales, que producen el fenómeno de pogo al acoplarse.

Se puede observar que la máxima altura alcanzada por la superficie libre del fluido en la simulación del tanque para una condición de aceleración repentina de 1 g lateral y 1.4 g vertical es aproximadamente dos veces mayor que la condición de reposo.

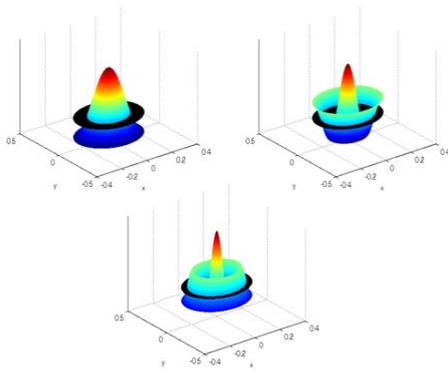


Figura 1 – Tres primeros modos de vibrar simétricos

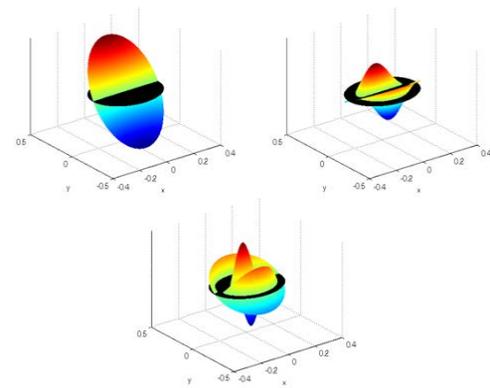


Figura 2 – Tres primeros modos de vibrar antisimétricos

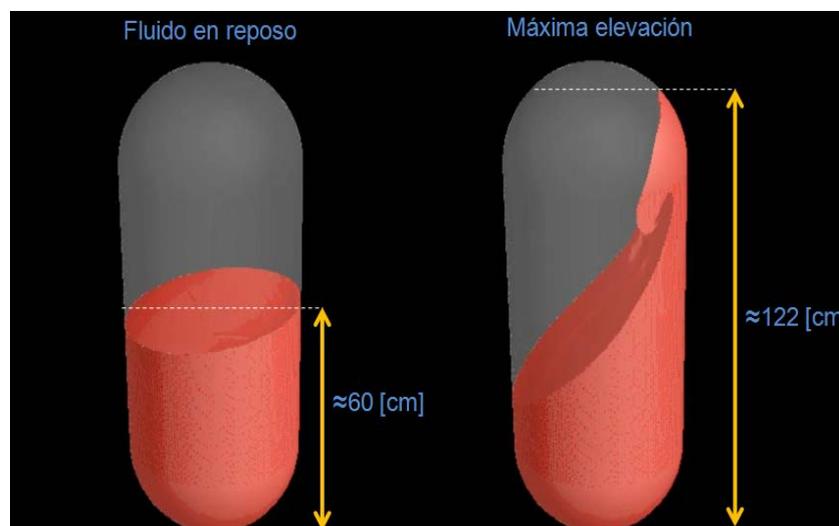


Figura 3 – Altura de elevación de líquido según simulación numérica computacional. Aceleración 1.4 g vertical y 1 g lateral.

Por lo tanto, esta gran elevación genera un gran corrimiento del centro de masas, que se traduce en aceleraciones indeseadas en el sistema. Desde este punto de partida se trabajó en el diseño de dispositivos supresores, que reducen la energía de los desplazamientos de fluido para mitigar este fenómeno.

Para el estudio del fenómeno de pogo, se analizan en primera instancia, los modos naturales del sistema de propulsión, para luego obtener las frecuencias y autovectores del sistema completo. Los resultados han sido obtenidos mediante el programa de cálculo numérico MATLAB.

Existen modos que no son oscilatorios, esto se debe a que existe sobreamortiguamiento en dichas frecuencias. De los modos oscilatorios (aquellos que presentan parte Imaginaria del autovalor distinta de cero), se ve que el 1º modo en el sistema de propulsión se acerca al 1º modo estructural, (el cual ha sido elegido para el acoplamiento del sistema).

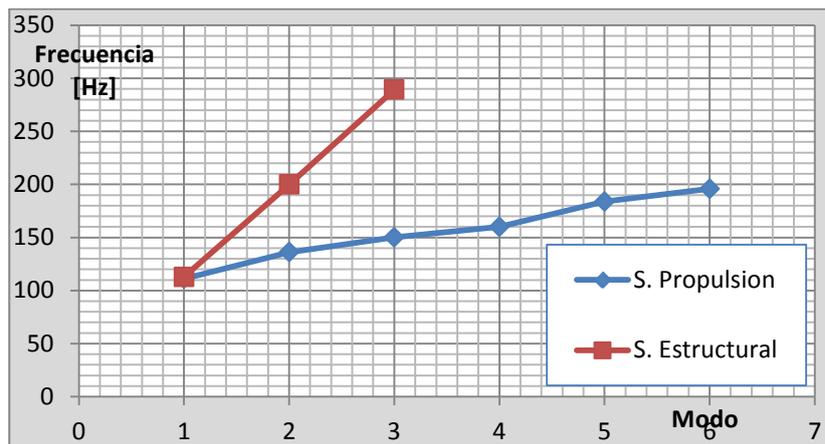


Figura 4 – Modos de vibrar longitudinales

Con el objetivo de visualizar el desarrollo del fenómeno de vorticidad en las salidas de tanques, se realizó una experimentación cualitativa del mismo, utilizando un tanque plástico con un gran angostamiento en la salida, tratando de observar el desarrollo del fenómeno de forma libre y luego implementando un dispositivo anti-vortex simple, consistente en dos placas en forma de “cruz” (o cuatro superficies perpendiculares), para analizar el efecto de mitigación sobre el fenómeno. El tanque se encontraba abierto en su parte superior, y la descarga del fluido se producía a presión atmosférica, por lo cual no existía diferencia de presiones. No se tuvo en cuenta en esta instancia la presurización del tanque, dado que este ensayo se realizó para obtener resultados cualitativos.

Conclusiones

Se estudiaron los distintos problemas de interacción en los sistemas de almacenamiento de combustible líquido para vehículos espaciales, implementándose métodos que permiten modelar los acoplamientos estructura – sistema de combustible para analizar la dinámica del conjunto y determinar aquellas posibles frecuencias que lleven a una inestabilidad del vehículo, tanto en el sentido axial (*pogo*), transversal (*sloshing*) y rotacional (*vortex*). Los distintos métodos fueron implementados a través de programas en MATLAB y simulación numérica mediante *Fluent*. Las entradas incluyen los modos naturales del sistema estructural, como también los parámetros necesarios para describir los elementos del sistema de combustible, tales como las geometrías y características físicas e intrínsecas de los fluidos. A partir de los resultados de estos estudios, se diseñaron y construyeron dispositivos antipogo, antisloshing y antivortex adaptados a un vehículo particular en estudio.

Bibliografía

1. Bohdan, W. Oppenheim, Rubin, S., “Advanced Pogo Stability Analysis for Liquid Rockets”. *Journal of Spacecraft and Rockets*. Vol. 30, Nº 3, May – June 1993.
2. Bruno, Scarabino, Bacchi, “Diseño De Dispositivos Anti-Sloshing Para Un Vehículo Espacial De Combustible Líquido”, Congreso de Fluidos 2012, 2012.