

DISEÑO DE DISPOSITIVOS ANTI-SLOSHING PARA UN VEHICULO ESPACIAL DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO

DESIGN OF ANTISLOSHING DEVICES FOR A LIQUID FUEL SPACE VEHICLE

L.J.A Bruno.^{a*}, A. Scarabino ^a, F.Bacchi, ^a

^a Grupo de Fluidodinámica computacional (GFC) – Universidad Nacional De La Plata.
Calle 116 e/ 47 y 48 - La Plata (1900) - Buenos Aires - Argentina

Recibido: 20/12/2012; aceptado: 19/03/2013

En este trabajo se presentan cálculos del efecto de “sloshing” en un tanque cilíndrico vertical sometido a aceleraciones, y el diseño de anillos amortiguadores para mitigar el mismo. El diseño, basado en el amortiguamiento de un modelo lineal es testeado en una simulación numérica mostrando resultados satisfactorios. Por último se presenta un modelo mecánico equivalente tipo “masa-resorte”, que permite evaluar rápidamente la respuesta del sistema a distintas excitaciones externas.

Palabras claves: sloshing, superficie libre, vehículo espacial, amortiguamiento

This paper analyzes the sloshing effect in a cylindrical tank submitted to accelerations and the design of ring dampers to mitigate the free surface oscillations. The dampers show an acceptable efficiency in a numerical simulation. Additionally, a “mass-spring” equivalent mechanical model is implemented, which allows rapid computations of the system response to external excitations.

Keywords: sloshing, free surface, space vehicles, damping

I. INTRODUCCIÓN

El fenómeno de “sloshing” es definido como un movimiento ondulatorio de la superficie libre de un líquido dentro de un recipiente parcialmente lleno. [1,2] Este movimiento relativo del fluido trae asociadas inestabilidades dinámicas que pueden perjudicar el correcto desempeño e incluso llevar a la falla a sistemas en donde la interacción entre el fluido y la estructura se hace muy importante, como en este caso, sistemas de almacenamiento de combustibles líquido en vehículos espaciales). [1-4] El líquido en movimiento dentro de los contenedores produce aceleraciones adicionales y corrimientos del centro de masa, afectando la estabilidad del vehículo y principalmente el control durante las distintas etapas de vuelo.

El estudio de este fenómeno es de vital importancia para procurar eliminar o minimizar los efectos negativos asociados a su desarrollo y garantizar el éxito de la misión.

Las oscilaciones en las masas del combustible y oxidante resultan del desplazamiento lateral o de la rotación angular (*spinning*) del vehículo durante la fase propulsada del vuelo y pueden perjudicar el correcto desempeño e incluso llevar a la falla a este tipo de sistemas en donde la interacción entre el fluido y la estructura es importante [2,3,5]. Por ello, es necesario el estudio y el análisis en profundidad de los mecanismos por los cuales se da lugar dicho fenómeno en el sistema

bajo estudio, con el fin de poder crear soluciones que garanticen la óptima operación del mismo.

El movimiento de un líquido dentro de su contenedor posee infinitas frecuencias naturales, pero las más bajas de algunos modos son las que tienen mayor probabilidad de ser excitadas por el movimiento del vehículo, por lo tanto, la forma de caracterizar la interacción entre el fluido y la estructura es a través de las frecuencias naturales del sistema y la determinación de las mismas es el primer objetivo que se presenta a largo del estudio del fenómeno.

Es importante lograr la minimización o eliminación del fenómeno de sloshing en tanques de combustible de vehículos espaciales con las características del que se analiza en el actual trabajo para lograr un correcto funcionamiento del conjunto. [4,6]

Se analizaron distintas formas que se han utilizado para la supresión de este fenómeno y en base a ello se estudió la más indicada para implementar en el caso en particular bajo estudio, teniendo en cuenta criterios como efectividad, facilidad constructiva, economía, factibilidad, etc.

Básicamente, estos dispositivos se utilizan para amortiguar el movimiento del líquido y para reducir las cargas inducidas por desarrollo del fenómeno.

A continuación se enumeran los parámetros principales que influyen en el diseño de dispositivos de supresión de sloshing: [4]

*leonardo.bruno@ing.unlp.edu.ar

1. Perfil de la misión del vehículo y su trayectoria.
2. Los requerimientos de amortiguación para un tanque específico.
3. Las características físicas del tanque incluyendo su geometría, deformación elástica, y el aislamiento.
4. Características funcionales del sistema, alimentación y vaciado de tanques, requerimientos de ventilación, etc.
5. Propiedades físicas y químicas del líquido alojado.
6. Cargas de impacto que deben soportar los dispositivos.

Existen varios tipos de dispositivos de supresión de sloshing que se han empleado con éxito para aumentar la amortiguación del fenómeno en el movimiento de vehículos espaciales. Estos dispositivos incluyen anillos deflectores rígidos y flexibles (de diversa geometría y orientación), placas en forma de cruz, placas flotantes, etc. [4]

En el presente trabajo se estudia el fenómeno de oscilación de la superficie libre de forma analítica para abordar el diseño de dispositivos “*anti-sloshing*” y la comparación de estos resultados con modelos computacionales. Estos dispositivos pasivos generan en el sistema una amortiguación adicional a la natural del mismo, que minimiza el movimiento relativo del fluido dentro del tanque disminuyendo las inestabilidades asociadas a dicho movimiento. También se presenta en el actual trabajo, el desarrollo de un modelo mecánico equivalente que permite determinar fuerzas y momentos generados por el sistema cuando este es perturbado a través de una fuerza o desplazamiento que resulta imprescindible para el dimensionamiento del contenedor.

II. DESARROLLO

En el presente trabajo se pueden diferenciar distintas etapas que se abordaron a lo largo del estudio y son desarrolladas brevemente a continuación:

Estudio de la problemática

Como fue mencionado con anterioridad, el fenómeno de sloshing trae asociadas inestabilidades dinámicas en los tanques de combustible y oxidante, que son una fuente potencial de perturbación en la estabilidad de vehículos espaciales que contienen masas relativamente grandes de estos líquidos.

El estudio dinámico del sloshing se basa en el desarrollo del campo de ecuaciones del fluido para poder estimar la ecuación de frecuencias, la cual nos permitirá realizar una primera aproximación para el diseño de la geometría del tanque de manera minimizar la interacción entre el fluido y la estructura. Dicha ecuación se obtiene a partir del desarrollo de la ecuación de Euler, considerando el movimiento de una partícula sobre la superficie libre del líquido asumiendo las siguientes consideraciones:

1. Se considera a un recipiente rígido de altura “h” y radio “R” moviéndose a lo largo de una trayectoria cualquiera del espacio
2. Flujo incompresible, no viscoso e inicialmente irrotacional
3. La formulación es aplicable tanto a la oscilación libre como a la forzada de la superficie libre del líquido.
4. Se utiliza una terna inercial y una terna móvil, esta última solidaria a la superficie libre del fluido (Fig. 1)

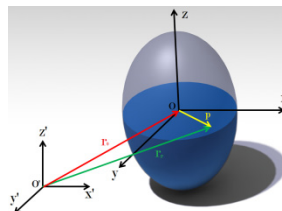


Figura 1: ternas fija y solidaria al fluido.

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + (\bar{q} \cdot \nabla) \bar{q} = -\frac{1}{\rho} \nabla P - \bar{v}(g, z)$$

Ecuación de Euler

A través del desarrollo de las ecuaciones de Euler y de una formulación variacional, se obtiene la expresión [4] que nos brinda las frecuencias naturales para los distintos modos (modelo lineal).

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

- g = Aceleración de la gravedad
- R = Radio del recipiente
- H = altura del fluido
- ζ_{mn} = Raíces de la función de Bessel del primer tipo
- ρ = Densidad

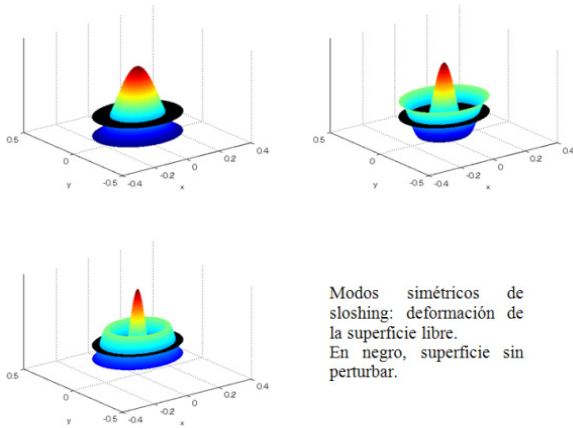
Tabla 1. Frecuencias naturales reducidas*

Nº Modo	1	2	3	4	5
Modos simétricos	1	13.531	16.293	18.646	20.732
Modos antisimétricos	1	17.023	21.531	24.670	28.401

*Frecuencia natural reducida: Frecuencia del modo “n” sobre frecuencia del primer modo.

A partir de las ecuaciones determinadas en el desarrollo del modelo analítico, se puede obtener las expresiones de la deformación de la superficie libre (Ref. 4 -), para los modos simétricos y para los antisimétricos y obtener las correspondientes frecuencias y deformaciones de la superficie (Figura 2 y Figura 3):

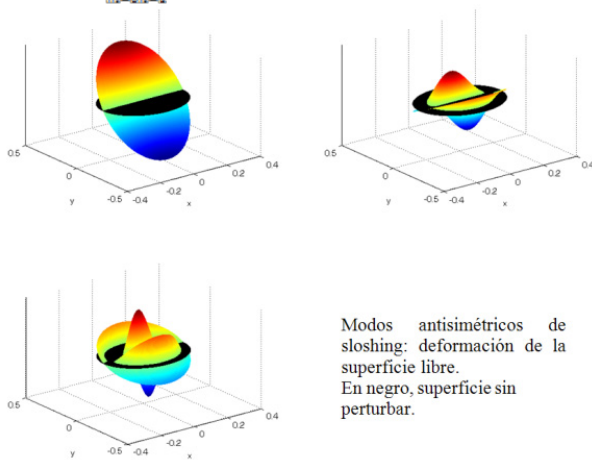
$$\eta(r, \theta, z) = \frac{1}{g} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_{mn} \cos(m\theta) J_n(\lambda_{mn} r) \cosh(\lambda_{mn} z) \omega_{mn} \cos(\omega_{mn} t)$$



Modos simétricos de sloshing: deformación de la superficie libre. En negro, superficie sin perturbar.

Figura 2. Modos simétricos de sloshing.

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



Modos antisimétricos de sloshing: deformación de la superficie libre. En negro, superficie sin perturbar.

Figura 3. Modos antisimétricos de sloshing.

Estudio de dispositivos anti-sloshing

Por las características del tanque bajo estudio se propuso como la configuración más apta para la implementación un sistema de dispositivos deflectores rígidos, “anillos”, ubicado en el interior del tanque.

La eficacia de supresión de estos dispositivos, se expresa comúnmente con un factor, el factor de amortiguamiento, que da una idea de absorción de energía que produce el dispositivo en el sistema.

Los anillos deflectores tanto rígidos han tenido gran aplicación como dispositivos de supresión de sloshing y han sido ampliamente utilizados en casos de recipientes cilíndricos.

El amortiguamiento proporcionado por un anillo deflector rígido se analiza por analogía al arrastre que se genera en una placa plana inmersa en un flujo oscilatorio.

Para ello se consideran las siguientes hipótesis:

- El líquido oscila en los modos fundamentales de sloshing.
- La dirección del movimiento se supone normal al anillo
- El flujo en las proximidades del anillo no se ve afectado por la superficie libre ni por el fondo del

tanque. Esto requiere suponer que el anillo ocupa un pequeño porcentaje de la superficie transversal del tanque y que no se encuentra cercano al fondo.

Para la obtención del factor de amortiguamiento debido a la incorporación de anillos deflectores en el sistema, se utiliza la ecuación (1) que expresa dicha relación[5]:

$$\gamma = \frac{|dE / dt|}{2\omega E} \quad (1)$$

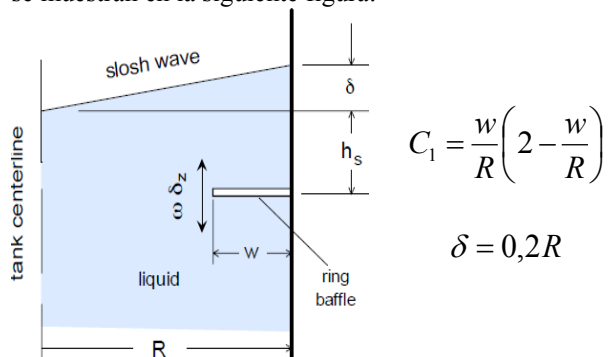
Siendo:

- γ : factor de amortiguación.
- ω : frecuencia natural (en rad/s)
- E: Energía mecánica

En la Tabla 2 se muestran tabulados a modo de ejemplo los valores de amortiguación de los anillos rígidos obtenidos para el caso estudiado en función de la profundidad de ubicación de los mismos (h_s) para tres valores diferentes de ancho de anillo (w) según la expresión (de [4]):

$$\gamma_{baffle} = 2.83e^{-4.6(h_s/R)} C_1^{3/2} (\delta/R)^{1/2} \quad (2)$$

Los parámetros utilizados en la anterior expresión, se muestran en la siguiente figura:



$$C_1 = \frac{w}{R} \left(2 - \frac{w}{R} \right)$$

$$\delta = 0,2R$$

Figura 4 – Parámetros de la ecuación (2)

La figura 5 muestra los valores graficados que se obtienen de la tabla 2, los cuales representan la variación el factor de amortiguamiento a medida que la superficie libre se aleja del anillo deflector adimensionalizado con la altura del tanque (cuando $h/h_s=0$ la superficie libre está sobre el anillo, que representa el caso de mayor amortiguamiento). Esto nos sirve como criterio de diseño para determinar la separación mínima que debemos tener entre anillos para lograr el amortiguamiento que buscamos.

En la Figura 6 podemos observar curvas de factor de amortiguación típica encontradas en la bibliografía [Ref.4 -], la cual muestra como varía el factor de amortiguamiento en función de la geometría del tanque cilíndrico (d/r) para distintos anchos de anillo (w).

Una vez analizada la amortiguación que genera la introducción de un anillo al sistema, a través del factor de amortiguación correspondiente, se requiere hallar

una configuración de dispositivos calculando su separación relativa y la interferencia para lograr la mitigación requerida durante todo el vaciado del tanque (una amortiguación del 10%).

Tabla 2. Factor de amortiguamiento

Profundidad de ubicación del anillo	Factor de amortiguamiento		
hs [m]	γ	0,55	2,80E-06
0,01	0,01995368	0,6	1,23E-06
0,05	0,010342594	0,65	5,42E-07
0,1	0,004548703	0,7	2,38E-07
0,15	0,002000533	0,75	1,05E-07
0,2	0,00087984	0,8	4,61E-08
0,25	0,000386956	0,85	2,03E-08
0,3	0,000170184	0,9	8,91E-09
0,35	7,48E-05	0,95	3,92E-09
0,4	3,29E-05	1	1,72E-09
0,45	1,45E-05	1,05	7,58E-10
0,5	6,37E-06		

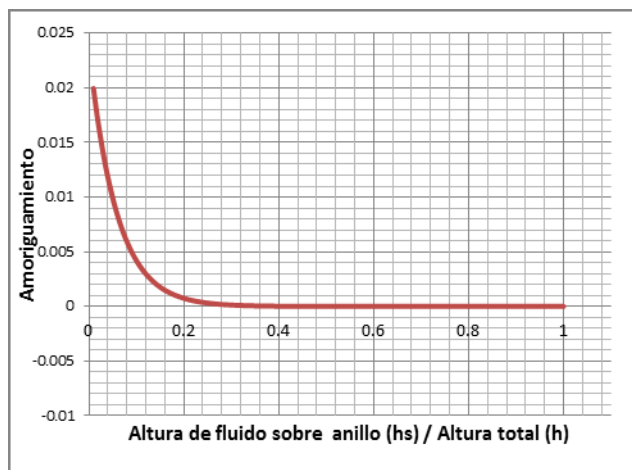


Figura 5. Variación del factor de amortiguamiento.

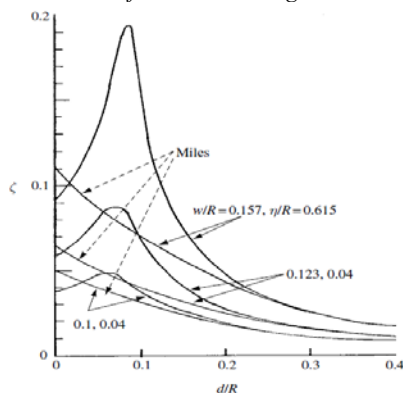


Figura 6. Factor de amortiguación en función de los parámetros del tanque [4]

La Figura 7 muestra un gráfico que representa la variación del factor de amortiguación en función de la altura que ocupa el fluido en el tanque, una vez definida la separación entre anillos que permite mantener un nivel mínimo de amortiguación aceptable (promedio de 0,1= 10% de disipación). El cálculo del factor de disipación se realiza sumando las contribuciones de todos los anillos, cada uno en forma independiente, de acuerdo a su profundidad.

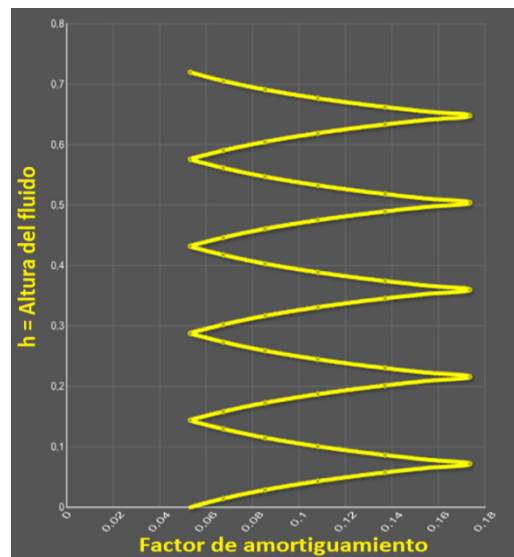


Figura 7. Variación del factor de amortiguamiento en función de la altura del fluido.

Comparación con modelo numérico computacional.

La problemática principal que presenta el fenómeno de sloshing es la aparición de aceleraciones a causa del desplazamiento relativo del fluido dentro del tanque. El objetivo principal del estudio se centra en tratar de minimizar estos desplazamientos relativos mediante la implementación de anillos deflectores rígidos.

La simulación computacional (CFD) es una herramienta que nos permite visualizar el comportamiento del fluido dentro del tanque en una determinada condición dinámica del vehículo, lo cual permite en este caso realizar una comparación entre los efectos que se dan lugar cuando en el tanque se implementan dispositivos anti-sloshing en contraste con el tanque sin la presencia de los mismos. Esta comparación entre ambos casos nos brinda una idea de la eficiencia en la supresión de los efectos dinámicos indeseables del fenómeno.

Se utilizó el software comercial FLUENT en el Grupo Fluidodinámica Computacional de la Facultad de Ingeniería de la UNLP, que utiliza el método de volúmenes finitos. El dominio fue discretizado en una malla híbrida de 1.25E6 elementos con refinamiento en la capa límite de tanque y anillos. Como modelo multifásico se utilizó el denominado VOF (volumen of

fluid) y controles de solución de segundo orden tipo "upwind". El paso de tiempo fue del orden de 1E-5s y se empleó para el cálculo un esquema NITA (Non-Iterative Time Advancement). Se fijaron los residuos para este problema en 1E-8. La figura 8 muestra un detalle de la malla en la región de los anillos y la 9 la geometría de los tanques.

Las condiciones de la simulación fueron: tanque cargado al 50% de su capacidad y aceleraciones longitudinal (1.4 g) y lateral (1 g) constantes, aplicadas en el instante inicial, a partir del fluido en reposo. Se utilizó un esquema explícito con discretización temporal de primer orden y espacial de segundo orden. El número de Reynolds basado en el ancho de los anillos y las máximas velocidades de desplazamiento de la superficie libre es aproximadamente 20000.

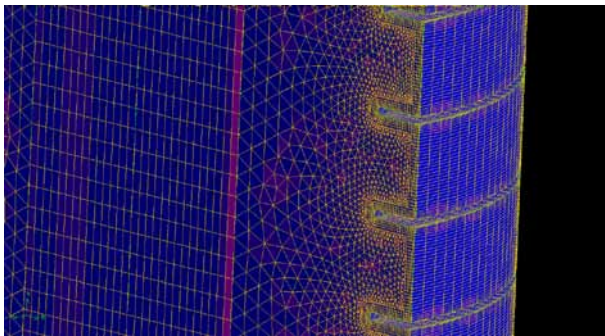


Figura 8. Detalle del mallado para el cálculo numérico.

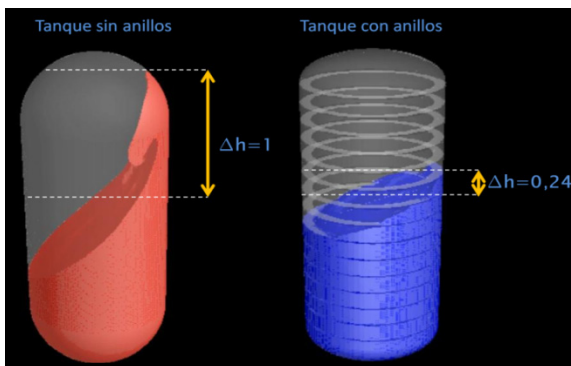


Figura 9. Comparación de la elevación de la superficie libre entre tanque con y sin anillos deflectores.

Si bien estos resultados son preliminares, el modelo respondió aceptablemente, reproduciendo la oscilación esperable de la superficie libre ante esas sollicitaciones. La figura 910 muestra los resultados obtenidos en la simulación para el caso de tanques con y sin anillos. Se observa una reducción en la altura máxima de oscilación del 76%.

Modelo mecánico

Se estudió de forma teórica un modelo mecánico de sloshing de manera que se pueda obtener la respuesta en fuerzas del sistema cuando este es perturbado y permite crear una señal forzante (tanto para desplazamiento como para giro) y observar cómo reacciona el sistema ante esa perturbación de

movimiento, siendo esto crucial para alimentar los sistemas de control y guiado de vehículos espaciales.

La construcción del modelo mecánico consiste en dividir la masa total del líquido dentro del tanque en una masa (m_0) que se mueve junto al tanque (sin desplazamiento relativo) y una serie de masas (m_n), que representan las masas equivalentes de cada modo de vibrar del sistema. Cada una de estas masas se encuentra sujeta a un resorte de constante K_n y a un amortiguador de constante de amortiguación C_n (que representa la amortiguación que le imparten al sistema los anillos anti-sloshing) La distancia en la dirección Z de la masa m_0 al C_g se denomina h_0 y las distancias en la misma dirección de las masas m_n al C_g se denominan h_n . En la Figura 10 se puede observar un esquema representativo del modelo junto con todos los parámetros mencionados.

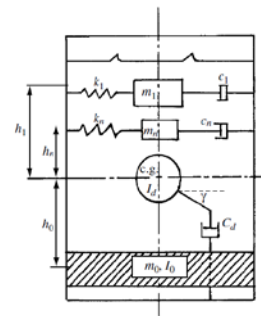


Figura 1011- Modelo masa-resorte-amortiguador

A través del estudio dinámico del sistema planteado y mediante las ecuaciones de Lagrange se obtienen las expresiones de las fuerzas y momentos como así también las de los parámetros característicos del sistema ($m_1, m_0, h_1, h_0, K_1, C_1$).

$$m_0(\ddot{X} - \ddot{\psi}h_0) + \sum_{i=1}^n m_i(\ddot{X} + \ddot{X}_i + \ddot{\psi}h_i) = -F_x$$

$$\ddot{\psi}I_c + h_0m_0(\ddot{X} - h_0\ddot{\psi}) - g \sum_{i=1}^n X_i m_i + \sum_{i=1}^n h_i m_i(\ddot{X} + \ddot{X}_i + \ddot{\psi}h_i) + I_c(\ddot{\psi} + \ddot{\gamma}) = My$$

(3)

Luego se traducen las expresiones de fuerzas y momentos obtenidas al dominio de Laplace, de forma de obtener relación entre entradas (forzantes de desplazamiento) y las salidas (fuerzas de respuesta) para poder evaluar cómo responde el sistema bajo una cierta condición impuesta (creación de la función de transferencia).

$$F_x(s) = -s^2 \left[X(s)m_f + \sum_{i=1}^n m_i X_i(s) \right]$$

(4)

Las funciones de transferencias creadas, se traducen en diagramas de bloques en Simulink. Las figuras 11 y 12 muestran respectivamente la forzante debida a oscilaciones del vehículo y las fuerzas resultantes debidas al movimiento de sloshing del fluido.

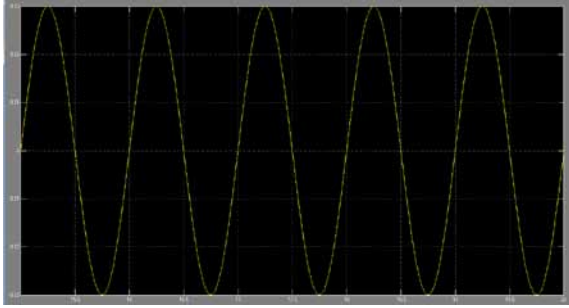


Figura 11 –Señal forzante en la dirección X

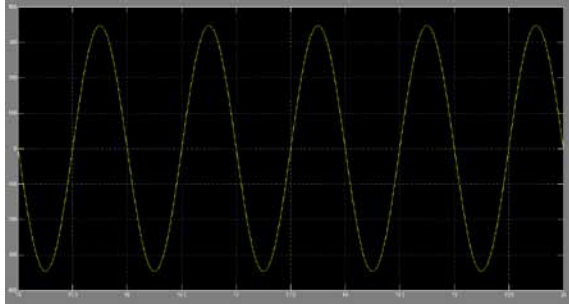


Figura 12. Respuesta en fuerza en la dirección X

III. CONCLUSIONES

El desarrollo del estudio y análisis de los distintos modelos nos permitieron comparar y verificar la eficacia de los dispositivos anti-sloshing estudiados, a través del amortiguamiento que imparten y mediante este, se pudo lograr arribar a una configuración de dispositivos para la implementación en los tanques bajo estudio, con valores de ancho y distancia entre anillos adecuados para un nivel de amortiguamiento aceptable.

El contraste entre las simulaciones presentadas (caso de tanque con y sin anillos) nos permite observar

que los dispositivos anti-sloshing propuestos, generan al sistema una amortiguación reduciendo en gran medida el movimiento del fluido dentro del tanque y cumpliendo el objetivo planteado para el presente estudio.

Una versión extendida de este trabajo puede consultarse en la referencia [7].

IV. REFERENCIAS

- 1 - Abramson H.N., The Dynamic Behavior Of Liquids In Moving Containers- With Applications to Space Vehicle Technology, NASA SP 106, 1966.
- 2 - Abramson H.N., Slosh Suppression, Space vehicle Desig Criteria (structures), NASA SP 8031.
- 3 - Dodge, F., THE NEW “Dynamic behavior of liquids in moving containers”, Southwest Research Institute, San Antonio, Texas, 2000.
- 4 - Ibrahim, R, Liquid Sloshing Dynamics. Theory and Applications. Cambridge University Press. 2005
- 5 - Abbas Maleki_, Mansour Ziyaeifar, Sloshing damping in cylindrical liquid storage tanks with baffles, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), No. 26, Arghavan Street, Tehran 19395-3913, Iran.
- 6 - Helmut F. Bauer, propellant sloshing problems of saturn test flight sa-1 (U), MTP- AERO- 6 2 – 29, George c. Marshall space flight center
- 7 - Bruno, Leonardo: “Estudio del Fenómeno de Sloshing y diseño de dispositivos atenuadores para sistemas de almacenamiento de vehículos espaciales”. Depto. Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, 2013.