

Estudio del comportamiento dinámico de una boya sumergida con superficie libre bajo condiciones de vibración forzada

Study of the dynamic behavior of a submerged buoy with a free surface under conditions of forced vibration

Juan J. Flores^{1*}, Marcela A. Cruchaga¹, Cristian G. Santiana²

¹Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Santiago de Chile (USACH), Santiago de Chile, Chile, 8320000

²Facultad de Ciencias Pecuarias, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador, 060150

* Correspondencia: juanjof1@hotmail.com

Recibido 12 mayo 2019; Aceptado 27 mayo 2019; Publicado 06 junio 2019

Resumen: En el presente trabajo se estudia experimentalmente la interacción fluido-estructura de una boya sumergida con superficie libre en aceite vegetal. El montaje realizado consiste en una esfera de madera sumergida dentro de un tanque de sección cuadrada, sometido a diferentes condiciones de oscilación y cuyos movimientos son generados mediante una mesa vibratoria. El objetivo principal del trabajo es determinar el comportamiento dinámico de la esfera sumergida, para lo cual se utiliza la captura de imagen a través de una cámara de alta velocidad, con la cual se obtiene la posición de un objeto en cada fotograma. Además, se realiza el estudio de la evolución de la superficie libre con y sin objeto, en donde se varían valores de amplitud y frecuencia impuesta, para una única altura de llenado. Para una amplitud impuesta de 0.2 cm no hubo dificultades en cuanto al registro mediante sensores ultrasónicos, sin embargo, a medida que aumenta el valor de la amplitud se registran alturas de ola con altas pendientes y movimientos tridimensionales, lo cual dificultó su estudio. Posteriormente se realiza el estudio del efecto de la boya en la superficie libre, en donde se observa que a mayor amplitud y frecuencia de movimiento impuesto la amplitud de ola es mayor con presencia de la esfera. Por último, en la caracterización dinámica del sistema se registran movimientos planos en la mayoría de casos.

Palabras clave: Amplitud, boya, comportamiento dinámico, sloshing, superficie libre.

Abstract: *This research dealt with an experimental study of the interaction between fluid and structure of a submerged buoy with free surface in vegetable oil. The assembly consisted of a wooden sphere submerged inside a tank of square section, this sphere was abode by different oscillation conditions and its movements were generated by a vibrating table. The main objective of this study was to determine the dynamic behavior of the submerged sphere, for this purpose a capture of image through a high-speed camera was used; in this way, the position of an object in each frame was obtained. In addition, the study of the free surface evolution, with and without the object, was developed; the results showed varying amplitude values and imposed frequency, for a single filling height. For an imposed amplitude of 0.2 cm there were no difficulties regarding the registration through ultrasonic sensors; nevertheless, as the amplitude value increased, wave heights with high slopes and three-dimensional movements were recorded; this fact complicated the study. Subsequently, the effect of the buoy in the free surface was studied, it was observed that the greater the amplitude and the movement frequency, the greater the wave amplitude with the presence of the sphere. Finally, in the dynamic characterization of the system, flat movements were registered in most cases.*

Keywords: Amplitude, buoy, dynamic behavior, sloshing, free surface.

1 Introducción

La interacción fluido-estructura o *Interaction Fluid Structure* ha presentado un desafío para la ingeniería, existen diversas aplicaciones que abordan la interacción de fluidos, en las cuales se presentan soluciones para su transporte (Costarelli, Garelli, Cruchaga, Storti & D'Elia, 2015; Cruchaga, Reinoso, Storti & Celentano, 2013; Ausensi, 2014) así como para la captación de energía (Beirão & dos Santos, 2014).

La energía undimotriz corresponde a la energía cinética contenida en las olas producidas en océanos y mares, su explotación consiste en utilizar equipos como las boyas que se muevan junto a las olas, accionando un bloque de potencia que está conectado a un generador eléctrico. Por lo cual en el presente trabajo se pretende estudiar el comportamiento dinámico de boyas sumergidas. Hoy en día los captadores de energía marina son uno de los principales contribuyentes al desarrollo de las energías limpias a nivel mundial, donde la energía eléctrica es obtenida sin producción de contaminación hacia el medio ambiente, una de las ventajas de este tipo de energía es que está presente las 24 horas del día durante todo el año. Dentro del análisis fluido-estructura se destaca el *sloshing* (Cruchaga, Muñoz & Celentano, 2008). Este concepto corresponde al estudio de la superficie libre de líquidos contenidos en estanques cuando estos se someten a oscilaciones. Es muy importante la superficie libre tanto en aplicaciones físicas como en aplicaciones de ingeniería, tales son los casos de Cruchaga, Reinoso, Storti, & Celentano (2013), en los cuales se hizo un análisis numérico y experimental del *sloshing* en un estanque cuadrado parcialmente lleno con aceite vegetal, en dicho trabajo se hizo un estudio numérico y experimental de problemas de *sloshing* tridimensional (3D) utilizando como fluido el agua (Battaglia, Cruchaga, Storti, & D'Elia, 2016).

La interacción fluido-estructura ha sido estudiada ampliamente a nivel computacional, por ejemplo, Battaglia *et al.* (2016), realizaron la formulación de elementos finitos de malla fija para cuerpos sumergidos en un fluido en movimiento. Por lo cual en este trabajo se propone realizar experimentos a escala de laboratorio para el oleaje en un estanque sometido a vibraciones controladas mediante una mesa vibradora, cuyo movimiento impuesto produce un desplazamiento de la masa del fluido y después se va a incluir una boya sumergida cuya geometría es definida permitiendo investigar el comportamiento de dicho objeto producido por el movimiento de la masa de fluido.

En base a lo anterior, el presente trabajo se enfoca en el estudio de la respuesta dinámica de una boya sumergida en un estanque, teniendo como finalidad

evaluar el efecto del fluido sobre un sólido (boya), además de evaluar el comportamiento del objeto sobre la superficie libre. El modelo físico en estudio corresponde a un estanque en el cual se sumerge completamente una boya de densidad menor a la del fluido del cual está inmersa. Los datos experimentales se obtuvieron utilizando sensores ultrasónicos, un tanque rectangular con relación de aspecto 1:1 y una mesa vibradora que controla el movimiento del tanque.

2 Metodología

Para el experimento se realizaron 95 mediciones, 34 corresponden al estudio de la superficie libre sin objeto, 33 a la superficie libre con objeto y 28 al comportamiento dinámico de la boya.

La esfera utilizada es de madera tipo pino, el cual tiene un diámetro de 7.4 cm y una masa de 138.29 g, por lo que su densidad es de 0.6517 g/cm^3 .

La superficie libre hace referencia a la interfaz generada entre un líquido y el aire, para su estudio se someterá al estanque a cargas externas de forma cíclica, produciendo el denominado *sloshing*, el cual se podría traducir como el chapoteo del agua, es el movimiento que se produce en la superficie libre de los líquidos contenidos en estanques cuando estos ejercen alguna oscilación o translación (Cruchaga *et al.*, 2016).

Para el estudio de la superficie libre y el comportamiento dinámico de la boya se utilizó un estanque de acrílico de base cuadrada que contiene aceite vegetal cuya densidad es de 0.9124 g/cm^3 , el cual se coloca sobre una mesa vibradora a través del cual se aplica movimientos sinusoidales externos a diferentes amplitudes y frecuencias impuestas. Un movimiento en la superficie libre del fluido es generado, y de esta forma, proporciona movimiento a la boya. En la figura 1 se muestra el diseño del experimento.

La boya está sujeta a un hilo el cual está pivoteada en la base del estanque, lo cual permitirá un solo grado de libertad, donde el fluido de trabajo está sometido a condiciones atmosféricas. Los movimientos impuestos tienen amplitudes de 0.2 cm, 0.5 cm, 2 cm y 3 cm y frecuencias que varían de 0.8 Hz a 2 Hz, siendo f_n la primera frecuencia natural donde $f_n = 1.62 \text{ Hz}$.

2.1 Trabajo experimental

Un tanque de acrílico lleno de aceite vegetal comercial se monta en una mesa vibradora y está sujeto a vibraciones controladas. La mesa vibradora se activa mediante un motor el cual está conectado a

un tornillo giratorio, que produce un movimiento que varía en una dimensión. La amplitud y frecuencia del movimiento impuesto se pueden controlar a través de un software denominado QuaRC, cuyo panel principal de interacción con el usuario se muestra en la figura 2, este software contiene rutinas hechas en simulink de Matlab (Arce & Vianna, 2009).

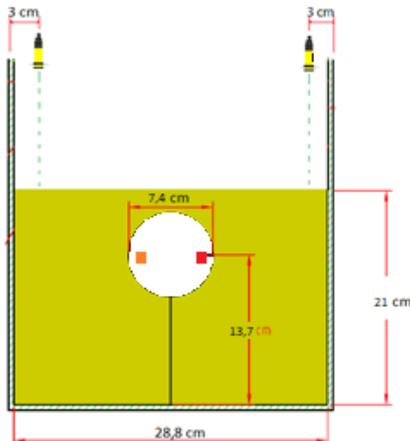


Figura 1: Configuración experimental.

Para determinar la evolución de la superficie libre se utilizaron cuatro sensores ultrasónicos Banner modelo S18UUA, representados con la letra S, los cuales están colocados en la tapa del estanque, los sensores funcionan con una fuente de poder de corriente continua, y reportan una tensión de salida de 0 V y 10 V los cuales corresponden a 30 mm y 300 mm con una precisión de $\pm 0,5$ mm (Alliedelec, 2018). Si hay un error asociado con la pendiente de la superficie libre los sensores no pueden capturar correctamente la altura de la ola, por lo cual es necesario utilizar la captura de imagen para obtener los valores perdidos por los sensores. Para establecer el comportamiento dinámico de la boya se utilizó una cámara de alta velocidad AOS QPRI, la cual es capaz de grabar una gran cantidad de fotogramas por segundo (en inglés *frames per second* y abreviado FPS) (AOS Technologies, 2018).

2.2 Adquisición de imágenes

Mediante el uso de la cámara de alta velocidad se establece la posición del sistema, tanto de la boya como del estanque, para lo cual se utilizaron 3 marcadores. Para todos los ensayos se utilizó una resolución de 1100 x 1100 píxeles, mientras que la velocidad de captura (fps) varía para cada estado del movimiento de la superficie libre tal como se detalla en la tabla 1.

El código usado fue programado en Python con la librería OpenCV (Python, 2013). Para procesar las grabaciones se debe de dividir cada video en

fotogramas mediante el programa ffmpeg (Soto, 2014). Se analiza el primer fotograma mediante el software de uso libre Gimp, para definir las regiones de interés, como son los marcadores y la boya, una vez definidos los parámetros se ejecuta el programa en Python, el cual procesa cada fotograma.

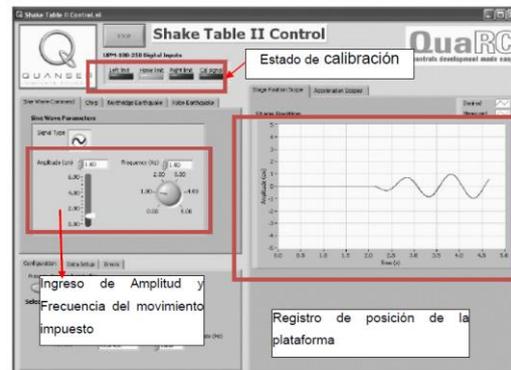


Figura 2: Panel de control QuaRC.

Tabla 1: Velocidad de captura en la adquisición de imagen.

Transiente	Estacionario	Decaimiento
60 fps	60 fps	120 fps

2.3 Comparación del método de captura de imagen y sensor ultrasónico

En la figura 3 se muestra la gráfica obtenida al superponer los datos por el sensor ultrasónico y los obtenidos por el procesamiento de imagen, en ambos métodos se estableció la posición de la mesa para una amplitud de 3 cm.

2.4 Frecuencia natural analítica de la superficie libre

La frecuencia natural está representada por la ecuación (1), según lo propuesto por (Faltinsen, Rognebakke, & Timokha, 2005) la cual es usada para cualquier geometría del estanque sea cuadrada o rectangular.

$$w_{i,j}^2 = g^* \lambda_{i,j} \tanh(\lambda_{i,j} H^*) \quad (1)$$

Donde los sub-índices i, j corresponden a los modos de oscilación de la superficie libre en el largo y ancho respectivamente, las constantes normalizadas g^* y H^* están definidas en las ecuaciones (2) y (3) respectivamente.

Finalmente el término $\lambda_{i,j}$ contempla la oblicuidad del movimiento la cual está definida en la ecuación (4).

$$g^* = \frac{g}{L_1} \quad (2)$$

$$H^* = \frac{H}{L_1} \quad (3)$$

$$\lambda_{i,j} = \pi \sqrt{i^2 + S^2 j^2} \quad (4)$$

Donde g es la constante de gravedad, H representa la altura de llenado del fluido y S es la relación de aspecto, la que se define como el cociente entre el largo del estanque sobre el ancho de este mismo. Las primeras frecuencias naturales de la superficie libre a diferentes alturas de llenado se presentan en la tabla 2.

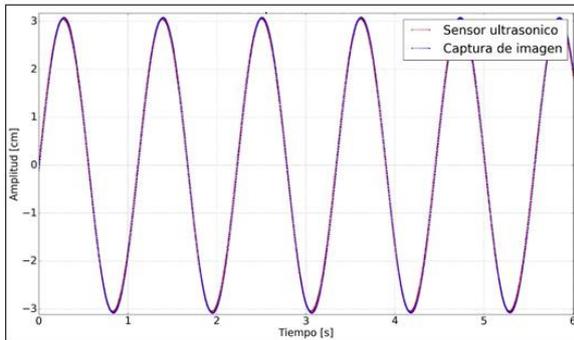


Figura 3: Comparación del movimiento de la mesa mediante sensor ultrasónico y captura de imagen.

Tabla 2: Primera frecuencia natural analítica de la superficie libre.

H [m]	f_n [Hz]
0.05	11.601
0.1	14.692
0.21	16.287
0.25	16.385

$$f_n = (g/(4\pi w) \tanh(\pi H/w))^{1/2}$$

donde $w = 0.288 \text{ m}$.

2.5 Frecuencia natural analítica de la boya

El modelo presentado corresponde a una boya sumergida confinado de acuerdo al desarrollo presentado por (Ausenci *et al.*, 2014). En la figura 4 se presenta la descripción geométrica del sistema.

La frecuencia natural en términos de las densidades y coeficientes de masa agregada están expresadas en la ecuación (5).

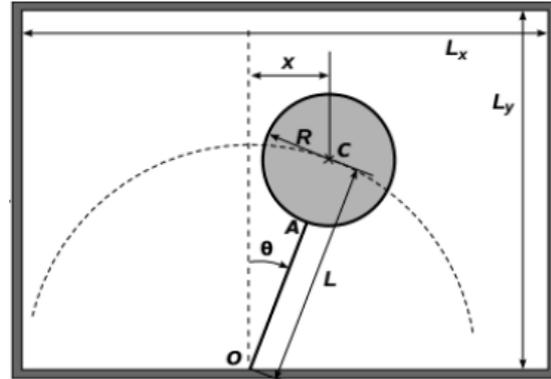


Figura 4: Boya sumergida confinado.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1-S}{c_a+S} \frac{g}{L}} \quad (5)$$

Donde S corresponde a la relación de densidades entre la boya y el fluido, mientras que c_a es el coeficiente de masa agregada y cuyo valor está en el rango de 0.45-0.55 según (Cruchaga *et al.*, 2016), aunque esos valores corresponden para el agua como fluido de trabajo y considerando el sistema como confinado.

3 Resultados y discusión

La diferencia en la amplitud de onda alcanzada por la superficie libre con y sin presencia de la boya se detallan en los siguientes gráficos. En la figura 5, se muestra la evolución de la altura de la superficie libre para los cuatro sensores, para el análisis completo para las frecuencias impuestas de 0.9 Hz y amplitud impuesta de 2 cm y 3 cm.

El régimen inicial transitorio se puede identificar durante la vibración forzada en especial para la amplitud impuestas de 2 cm. Se ve un régimen de descomposición amortiguado después de que se detiene la vibración de la mesa.

Una comparación de la altura de ola de la superficie libre se presenta en la figura 6, en donde los símbolos vacíos corresponden a valores de amplitud para la superficie libre sin la presencia de la boya, mientras que los símbolos llenos corresponden a los valores de amplitud de la superficie libre con la presencia de la boya.

Para una amplitud de 0.2 cm, para las mediciones inferiores a 1.40 Hz y para mediciones superiores a 1.7 Hz, las alturas alcanzadas por la superficie libre con y sin la presencia de la boya son del mismo orden, mientras que para una frecuencia cercana a resonancia es decir 1.45 Hz las alturas son menores con la presencia de la boya, representando una diferencia aproximada de 2 mm en los valles y crestas.

Finalmente, para una frecuencia de 1.7 Hz mayor a la natural para el primer modo se observa que la altura alcanzada por la superficie libre es mayor con la presencia de la boya, presentando una diferencia aproximada de 2 mm.

Para una amplitud de movimiento de 0.5 cm, las alturas alcanzadas por la superficie libre con y sin la presencia de la boya para las mediciones inferiores a 1.4 Hz son del mismo orden, mientras que para la frecuencia de 1.45 Hz las alturas alcanzadas son mayores con la presencia de la boya, representando una diferencia aproximada de 7 mm para las crestas, mientras que para los valles presenta una diferencia aproximada de 4 mm.

Para una amplitud de 2 cm, las alturas alcanzadas por la superficie libre con y sin la presencia de la boya para las mediciones inferiores a 1 Hz son del mismo orden, mientras que, para las frecuencias de 1.2, 1.25 y 1.3 Hz la altura alcanzada por la superficie libre varía en los valles con una diferencia aproximada de 4, 6 y 10 mm respectivamente, mientras que para las crestas son aproximadamente del mismo orden con y sin presencia de la boya.

Finalmente, para una amplitud de 3 cm, las alturas alcanzadas por la superficie libre con y sin presencia de la boya para las mediciones inferiores a 1 Hz son aproximadamente del mismo orden, para los casos de 1.1 Hz no se pudo establecer una comparación ya que la superficie libre humedece los sensores con la presencia de la boya, lo que ocasiona una lectura errónea de las alturas.

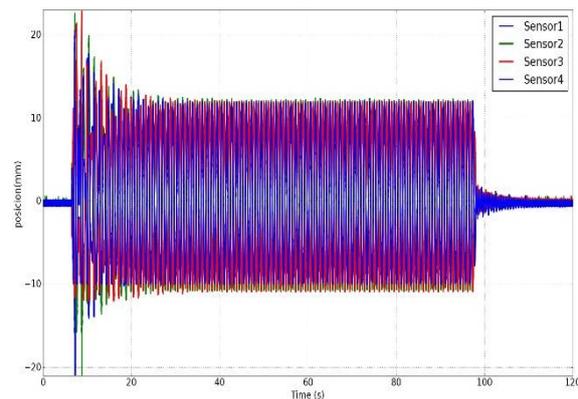
3.2 Desplazamiento de la boya

En la figura 7, se muestran los valores máximos del desplazamiento en la dirección x para la boya sumergida en estado estacionario para una amplitud de movimiento de 0.2 cm. El desplazamiento de la boya aumenta de forma simétrica hasta llegar a la frecuencia natural de la superficie libre, para después disminuir su amplitud.

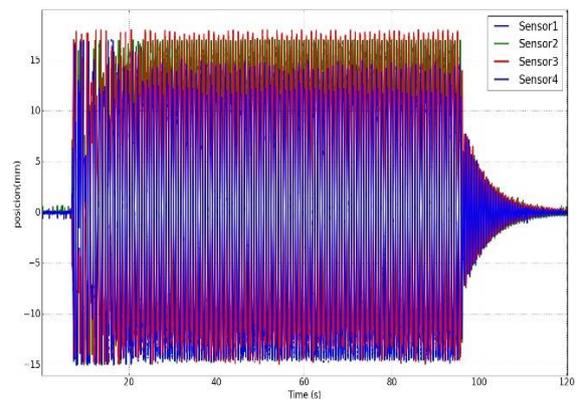
En la figura 8, se muestran las amplitudes máximas y mínimas para la boya en estado estacionario, la amplitud alcanzada por la boya para una amplitud de 0.5 cm es de forma simétrica, es decir que tiene la misma amplitud del lado derecho e izquierdo.

Mientras que para los casos de 2 y 3 cm de amplitud, a medida que aumenta la frecuencia, la boya se desplaza más hacia el lado derecho del estanque y el desplazamiento del lado izquierdo es menor.

En la figura 9, se muestra el desplazamiento de la boya en estado estacionario para un movimiento plano, en donde sigue una misma trayectoria, mientras que en la figura 10 se observa un movimiento giratorio debido a la aparición de los denominados efectos 3D, en donde el trayecto de la boya no es igual.



(a)



(b)

Figura 5: Evolución de la altura de onda experimental para los 4 sensores para una frecuencia impuesta de 0.9 Hz, (a) 2cm, (b) 3cm.

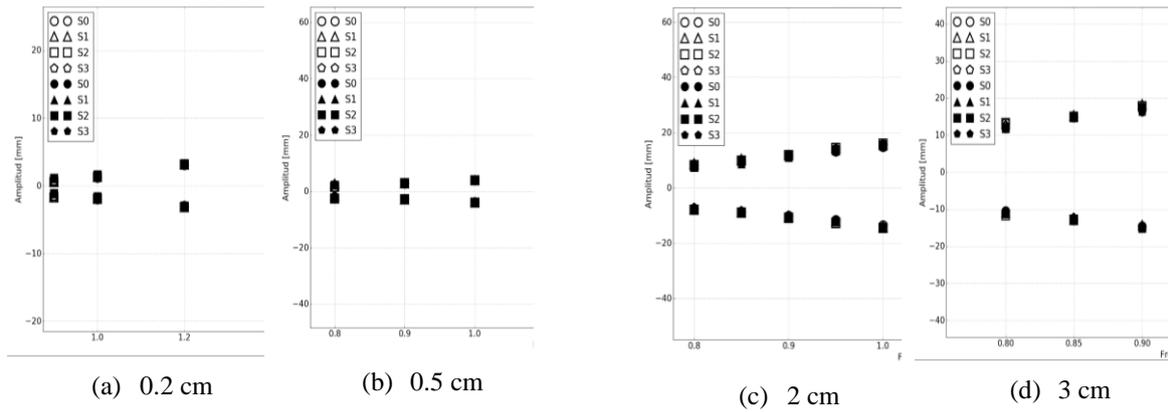


Figura 6: Comparación de altura de la superficie libre para diferentes amplitudes impuestas.

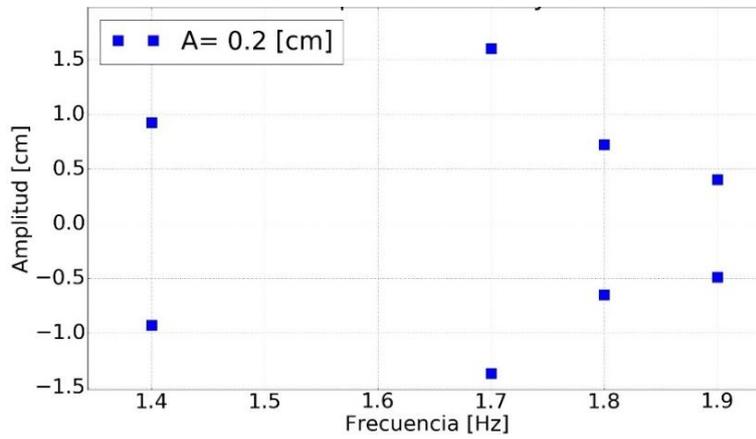


Figura 7: Valores máximos del desplazamiento de la boya sumergida con amplitud de 0.2 cm.

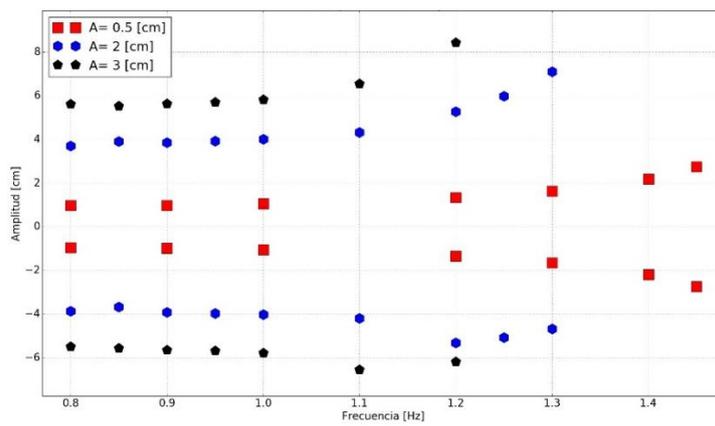


Figura 8: Valores máximos del desplazamiento de la boya sumergida con amplitud de 0.5, 2 y 3 cm.

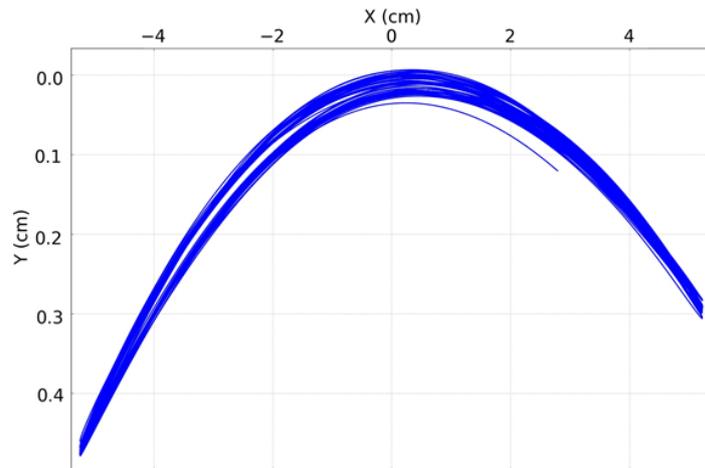


Figura 9: Movimiento plano de la boya en estado estacionario.

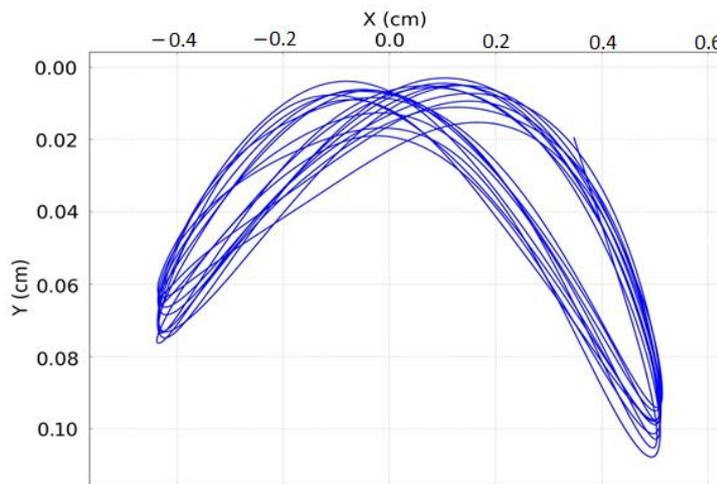


Figura 10: Movimiento 3D de la boya en estado estacionario.

4 Conclusión

Se analizó la evolución de la superficie libre sin boya con las técnicas de medición con sensores ultrasónicos y captura de imagen. Se obtuvo la primera frecuencia natural la cual es coherente con el modelo analítico de Faltinsen (2005), y con el estudio experimental, presentando un error de 1,82 %. Se pudo apreciar una influencia de la amplitud impuesta en la evolución de la superficie libre, se verificó que la magnitud de olas es proporcional a la amplitud de movimiento impuesto, ya que al aumentar este parámetro favorece a la aparición de efectos 3D en la superficie.

Se observó la influencia de la boya en la evolución de la superficie libre, en los casos en los que se utilizó una mayor frecuencia con la presencia de la esfera la superficie alcanza mayor amplitud, lo cual pudo ser ocasionado por la cercanía que existe entre el cuerpo y la superficie. Se pudo caracterizar el comportamiento dinámico de la boya al ser

excitada de forma sinusoidal con la mesa vibradora, determinando los desplazamientos de la esfera en los tres estados de movimiento, en cuanto al desplazamiento, llama la atención que para amplitudes y frecuencias altas la boya presenta mayor desplazamiento hacia el lado derecho.

La viscosidad del aceite favorece a movimientos planos de la boya, a diferencia del caso en donde la frecuencia impuesta corresponde a la natural para la superficie libre, en el cual presenta un comportamiento tridimensional. Además, se observó que en algunos casos en el estado estacionario la frecuencia de oscilación de la boya es cercana a la frecuencia impuesta en la mesa.

Conflicto de intereses

Los autores del presente trabajo declaramos que no existe ningún tipo de Conflicto de Interés.

Agradecimiento

Este trabajo se enmarca dentro del Proyecto FONDECYT N° 1170620 de la Universidad de Santiago de Chile.

Referencias

- Alliedelec. (2018). U-GAGE S18U Series Sensors with Analog Output. Recuperado de: <http://www.alliedelec.com/m/d/6e2638562cbaf a87e04e05b19b2d1f1e.pdf>.
- AOS Technologies. (2018). Q-PRI – High Speed Camera. Recuperado de: https://www.aostechnologies.com/fileadmin/user_upload/PDFs/Highspeed/AOS_Q-PRI_ProductLeaflet_en.pdf.
- Arce, A., Vianna, G. (2009). Manual de Simulink para la asignatura de teoría de sistemas. Recuperado de: <http://perso.ya.com/ecoterso/ManualSimulink.pdf>.
- Ausensi, S. (2014). *Análisis experimental del comportamiento dinámico de esferas sumergidas bajo condiciones de vibración forzada: Tesis presentada previa obtención del grado de Ingeniero Civil en Mecánica*. Universidad de Santiago, Santiago, Chile.
- Battaglia, L., Cruchaga, M., Storti, M. & D'Elia, J. (2016). Numerical Modeling and Experimental Validation of Free Surface Flow Problems. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 23, 139-169. DOI: 10.1007/s11831-014-9138-4.
- Beirão, P.J.B.F.N. & dos Santos Pereira Malça, C.M. (2014). Design and analysis of buoy geometries for a wave energy converter. *International Journal of Energy Environment Eng*, 5(91), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s40095-014-0091-7>.
- Costarelli, D., Garelli, L., Cruchaga, M., Storti, M. & Ausensi, R. (2015). An Embedded Strategy for the Analysis of Fluid Structure Interaction Problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 300, 106-128. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2015.11.001>.
- Cruchaga, M., Muñoz, C. Celentano, D. (2008). Simulation and experimental validation of the motion of immersed rigid bodies in viscous flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 197, 33-40. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2008.01.014>.
- Cruchaga, M., Reinoso, R., Storti, M. & Celentano, D. (2013). Finite element computation and experimental validation of sloshing tanks. *Computational Mechanics*, 52, 1301-1312. doi: 10.1007/s00466-013-0877-0.
- Cruchaga, M., Ferrada, C., Márquez, N., Osses, S., Storti, M. & Celentano, D. (2016). Modeling the sloshing problem in a rectangular tank with submerged incomplete baffles. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 26(3-4), 722-744. <https://doi.org/10.1108/HFF-08-2015-0315>.
- Faltinsen, O., Rognebakke, O. & Timokha, A. (2005). Classification of three-dimensional nonlinear sloshing in a square-base tank with finite depth. *Journal of Fluids and Structures*, 20(1), 81-103.
- Python. (2018). Python for Windows, Linux/UNIX, MacOS X, Other. Recuperado de: <https://www.python.org/downloads/release/python-276/>