

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIII CONGRESO CHILENO DE INGENIERIA HIDRAULICA**

**COMPARACIÓN DEL SOBREPASO DEL OLEAJE EN CANALES
EXPERIMENTALES, UTILIZANDO TEORÍAS DE GENERACIÓN DE OLEAJE DE 1^{er}
Y 2^{do} ORDEN. CASO DE ANÁLISIS: AV. PERÚ, VIÑA DEL MAR, CHILE, EN CANAL
BIDIMENSIONAL DEL INSTITUTO NACIONAL DE HIDRÁULICA (CHILE).**

IGNACIO BEYÁ M.¹

RESUMEN

En algunos estudios en modelación física, la generación de oleaje irregular utilizando teoría de 1er orden es suficientemente apropiada. Sin embargo, otros estudios requieren que la conformación de las olas sea más precisa, dando paso a la utilización de teorías de generación de 2do orden. Estos efectos de 2do orden pueden jugar un rol importante en la respuesta de estos modelos físicos (Hughes, 1993).

Este estudio analiza las diferencias que se generan al utilizar teorías de generación de oleaje de 1er y 2do orden, específicamente sobre los espectros de oleaje y el caudal de sobrepaso en el modelo físico de Av. Perú en Viña del Mar, desarrollado en el Instituto Nacional de Hidráulica (INH).

Las diferencias más importantes entre los resultados obtenidos al generar oleaje de 1er orden, respecto a los obtenidos utilizando teoría de 2do orden son: 1) la presencia de picos de energía espectral del oleaje de baja frecuencia, el cual se vuelve más evidente en los registros de las sondas de oleaje ubicadas en aguas más someras, y 2) la sobreestimación del caudal de sobrepaso medio en hasta un 90% aproximadamente para los casos en que las componentes sub-armónicas del oleaje fueron generadas usando teoría de 1er orden.

¹ Ingeniero de proyectos; Instituto Nacional de Hidráulica (Chile) - ignaciobeya@inh.cl

1. INTRODUCCIÓN

En algunos estudios en modelación física, la generación de oleaje irregular utilizando teoría de 1er orden es suficientemente apropiada. Sin embargo, otros estudios requieren que la conformación de las olas sea más precisa, dando paso a la utilización de teorías de generación de 2do orden, las que reproducen de mejor forma las componentes sub y súper armónicas que existen naturalmente. Estos efectos de 2do orden pueden jugar un rol importante en la respuesta de modelos físicos (Hughes, 1993).

Un tren natural de olas se puede pensar como una composición de miles de olas de distintas frecuencias (además de amplitud y dirección). Por simplicidad, consideremos dos frecuencias, f_1 y f_2 , que crearán un grupo de olas básico. Extendiendo la descripción lineal de este grupo de olas a una descripción de 2do orden, las ecuaciones muestran la aparición de otras componentes de frecuencias f_1-f_2 y f_1+f_2 . Ambas frecuencias están ligadas a las olas lineales básicas pero que claramente pertenecen a regiones de frecuencia distintas. La componente f_1-f_2 corresponde a ondas de grupo de baja frecuencia (sub-armónicos) y viajan con la velocidad de grupo, mientras que la componente f_1+f_2 es de alta frecuencia (súper-armónicos) y viaja con la velocidad determinada para las ondas básicas (Sand & Mansard, 1986). Estas ondas de grupo, sub y súper-armónicas, generan crestas más pronunciadas y valles más planos, tal como muestra la figura 1.

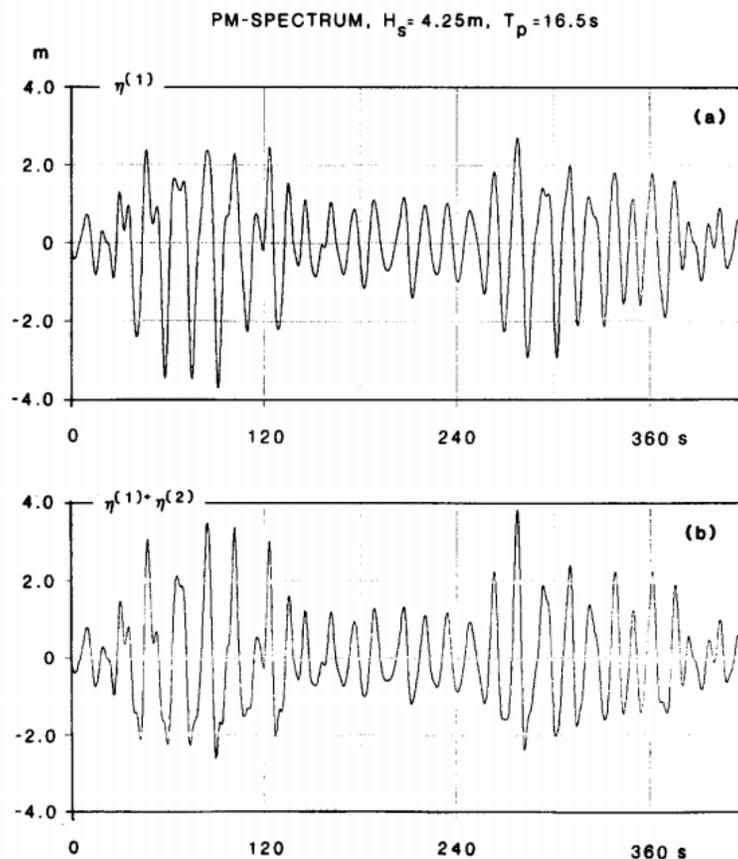


Figura 1. (a) Tren de ondas lineales obtenidas a partir del espectro Pierson-Moskowitz; (b) Mismo tren de ondas con componentes armónicas de 2do orden (fuente: Sand, 1986).

Los resultados de ensayos en modelación física son altamente dependientes de la correcta reproducción de las ondas de grupo y las ondas largas asociadas, en especial en ensayos de agitación en puertos y de movimiento de embarcaciones (Barthel et al., 1983; Sand & Mansard, 1986; Hughes, 1993), así como también en ensayos para evaluar el sobrepaso del oleaje (Hughes, 1993).

El presente trabajo analiza las diferencias que se generan al utilizar teorías de generación de oleaje de 1er y 2do orden, específicamente sobre el caudal de sobrepaso y los espectros de oleaje en el modelo físico de Av. Perú, de la ciudad de Viña del Mar en Chile, construidos en el canal de olas del Instituto Nacional de Hidráulica (INH, Chile).

2. MODELO FÍSICO

Los ensayos en modelo físico se realizaron en un canal de olas de 50 m de largo, 1.5 m de ancho y 1.8 m de alto, construido en hormigón armado. El equipo de generación de olas es de tipo pistón, eléctrico y de desplazamiento horizontal, fabricado especialmente para INH por la empresa española VTI. Este equipo es capaz de generar oleaje monocromático e irregular, a partir de espectros paramétricos clásicos o definido por el usuario, además de olas solitarias. El oleaje puede generarse tanto de 1er orden como de 2do orden en los sub-armónicos, de 2do orden en los súper-armónicos o de 2do orden (completo). El generador de olas tiene incorporado un sistema de absorción activa, que elimina / minimiza las ondas reflejadas. Lo anterior permite que el oleaje generado sea efectivamente el oleaje definido por el usuario, permitiendo realizar ensayos de larga duración. Para el control de la generación y absorción, la paleta cuenta con dos sondas resistivas que miden el nivel de agua en su parte frontal, éstas entregan información al ordenador, el cual corrige instantáneamente los movimientos de la paleta.

En el extremo aguas abajo se construyó en hormigón y a escala 1:30 un perfil de aproximación representativo del fondo marino frente a Av. Perú (figura 2) y sobre este se dispuso la defensa costera de escollera, también representativa de la situación actual de Av. Perú (figura 3).

La agitación al interior del canal de olas es registrada mediante sondas de oleaje resistivas, las que funcionan relacionando la conductividad en la sonda, con el nivel instantáneo de agua en la sección de canal donde está ubicada dicha sonda. La adquisición de datos se realizó con una frecuencia de 50 hz.

En la parte trasera de la obra se instaló un sistema que permite cuantificar volumétricamente el agua de sobrepaso. Este sistema consiste en:

- Una bandeja de hormigón que separa los flujos que pasan por sobre las partes laterales de la parte central de la defensa costera.
- Un estanque que recolecta la parte central del flujo, de 1 m de longitud, correspondiente a la sección que no están influenciada por los efectos de borde del canal.
- Limnómetro que permite la medición de los volúmenes de sobrepaso mediante la diferencia de alturas del nivel de agua en el estanque.

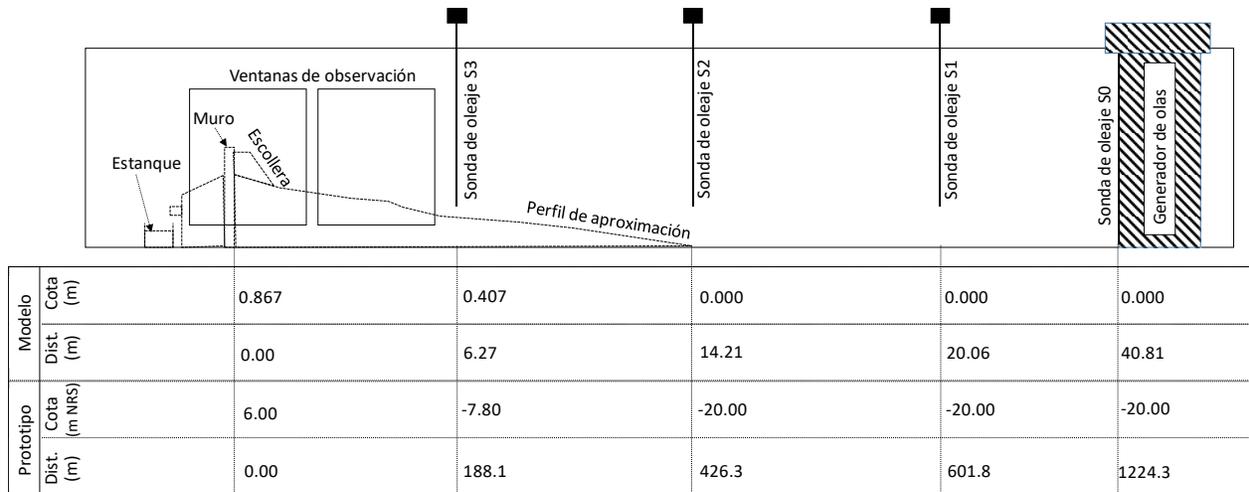


Figura 2. Esquema del canal de olas, ubicación de equipos e instrumentos, perfil de aproximación y defensa costera.

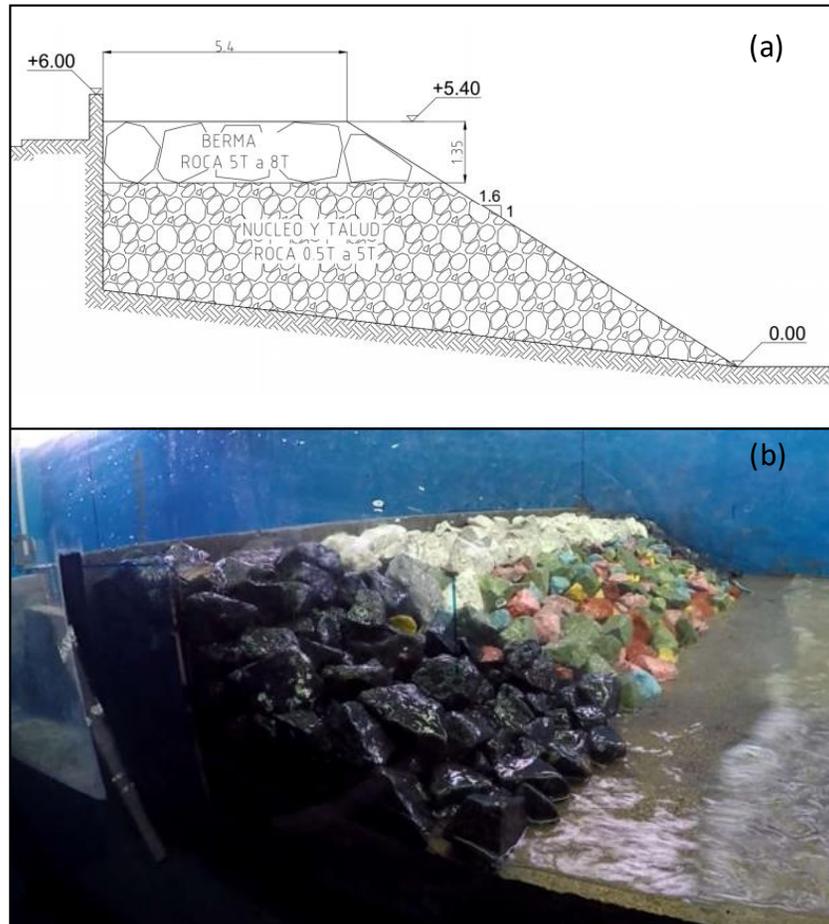


Figura 3. Defensa costera modelada (a) Esquema; (b) Implementación en modelo físico.

Los ensayos realizados para este trabajo resultan de una combinación de parámetros que definen las características del oleaje generado. Sin embargo para todos los ensayos, el oleaje incidente se

definió a partir del espectro paramétrico Jonswap con parámetro de acentuación (γ) igual a 1.5, valor obtenido de un ajuste de este espectro paramétrico a resultados de modelación numérica frente a Av. Perú para casos de marejada (INH, 2016). Para definir las series de tiempo de la superficie libre en el generador de olas, se utilizó el método que define la fase de cada componente de forma aleatoria. El nivel de agua en el modelo fue de 0.728 m, equivalente a un nivel de marea en prototipo igual a +1.85 m NRS.

Los parámetros variables que definen cada ensayo son los siguientes:

- H_{m0} : altura característica del oleaje. Se ensayaron 3 alturas, 10.4 cm, 15.6 cm y 18.5 cm (equivalentes en prototipo a 3.12 m, 4.69 m y 5.55 m respectivamente).
- T_p : Periodo pico del oleaje. Se ensayaron 2 periodos, 2.17 s y 3.21 s (equivalentes en prototipo a 11.9 s y 17.6 s respectivamente).
- Sub-armónicos de 1er orden / sub-armónicos de 2do orden.
- Súper-armónicos de 1er orden / súper-armónicos de 2do orden.

La duración de cada ensayo fue definida para que al menos se pudiesen reproducir 500 olas de periodo pico. 19 min para el caso de los ensayos con oleaje con T_p igual a 11.9 s y 27 min para el caso de los ensayos con oleaje con T_p igual a 17.6 s.

Cada una de las combinaciones se ensayó por segunda vez, dando un total de 48 ensayos y 1104 minutos de ensayos (18.4 hrs). Antes de cada ensayo se calibró todas las sondas de oleaje, tanto del sistema generador como las ubicadas a lo largo del canal.

3. RESULTADOS

Se realizó una comparación de los resultados del caudal de sobrepaso. Esta comparación se realizó bajo la suposición de que los ensayos realizados con oleaje de 2do orden (sub y súper-armónicos de 2do orden) son los ensayos que mejor representarían las condiciones de simulación en naturaleza. A partir de esta comparación se estimó los excesos en el caudal de sobrepaso medio obtenidos al utilizar teorías de generación menos completas o de menor orden (ver figura 4). La simbología para presentar los resultados de los ensayos para las distintas teorías de generación de oleaje es la siguiente:

- n_n : Teoría de generación de 1er orden.
- n_s : Teoría de generación de 1er orden en los sub-armónicos y de 2do orden en los súper-armónicos.
- s_n : Teoría de generación de 2do orden en los sub-armónicos y de 1er orden en los súper-armónicos.
- s_s : Teoría de generación de 2do orden completa, tanto para los sub-armónicos como para los súper-armónicos.

Se observa que las teorías que no reproducen correctamente las componentes sub-armónicas de 2do orden generan una sobreestimación media del orden del 80% hasta 90% aproximadamente, mientras que la teoría de generación que si reproduce adecuadamente las componentes sub-

armónicas pero no las componentes súper-armónicas genera una sobreestimación del orden del 20% aproximadamente. Estos valores de sobreestimación se obtienen a partir de la pendiente de las curvas ajustadas mediante el método de mínimos cuadrados, que relacionan los resultados obtenidos de los ensayos con oleaje de 2do orden con los ensayos que utilizaron teorías de menor orden.

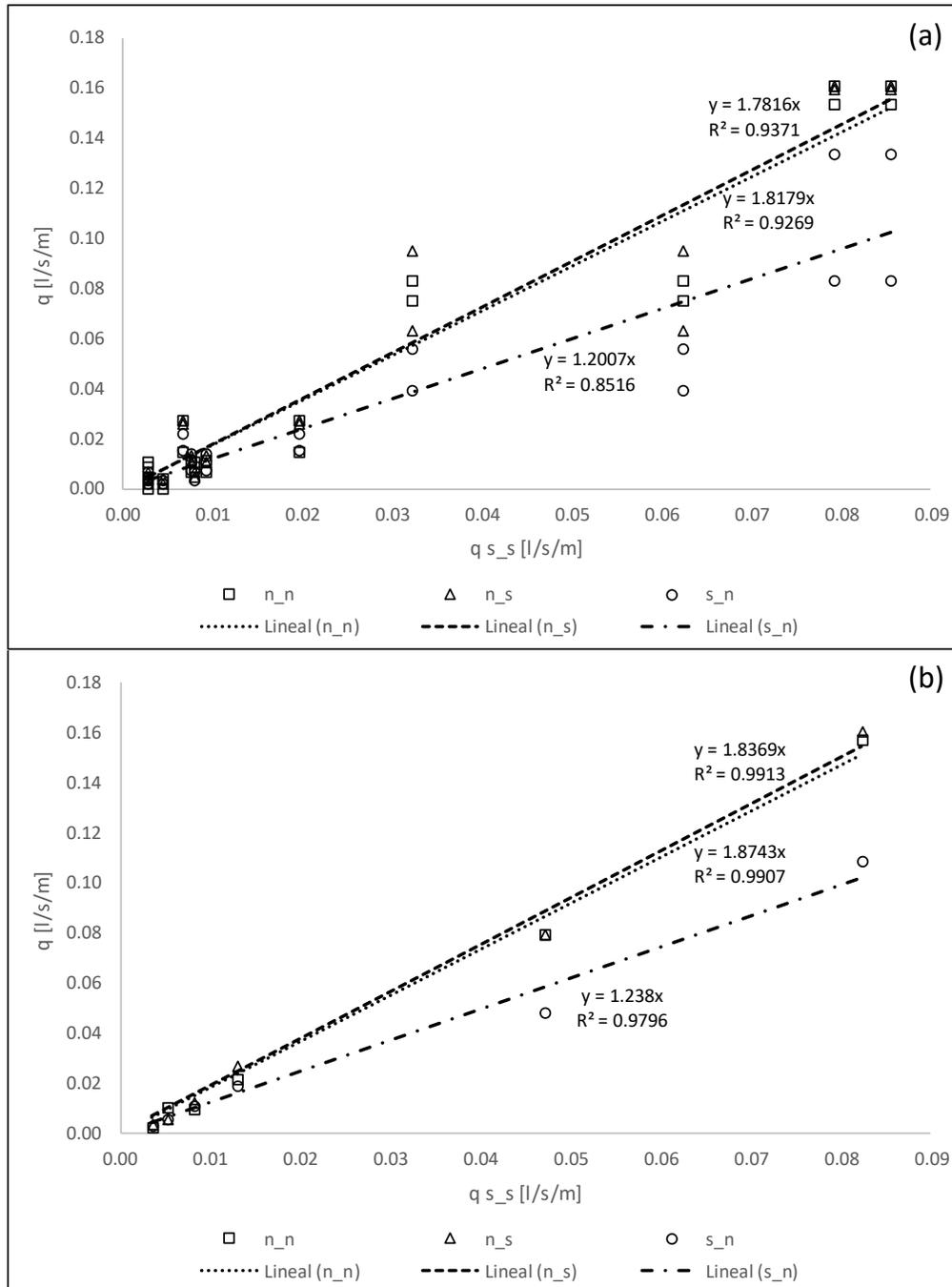


Figura 4. Comparación de las distintas teorías de generación de oleaje respecto a los resultados de caudal de sobrepaso medio. (a) Todos los ensayos; (b) Promedio de ensayos repetidos.

Por otro lado, se realizó un análisis espectral de los niveles de la superficie libre en la zona más cercana a la defensa costera y de donde ocurre el sobrepaso (sonda S3). Se obtuvo la energía de las componentes sub-armónicas, armónicas y súper-armónicas. Para realizar un análisis global, esta energía espectral fue normalizada y promediada, y se presenta para cada periodo pico modelado y teoría de generación utilizada (ver figura 5).

Se observan claras diferencias en los espectros obtenidos en el sector cercano a la defensa costera (sonda S3). Estas diferencias se ubican principalmente en la zona de baja frecuencias o sub-armónica, y se describen en la tabla 1.

Tabla 1. Diferencias en los espectros obtenidos en sonda S3 para las distintas teorías de generación según los periodos pico ensayados.

Ensayos	Comentario
Ensayos con periodo pico igual a 2.17 s	Para el espectro promedio de 1er orden (n_n) se observa una elevación importante de la energía en las frecuencias menores a 0.05 hz. Esta elevación está presente en solo 2 de los 6 ensayos realizados con teoría de generación de 1er orden.
	Entre las frecuencias 0.05 hz y 0.15 hz, las teorías que no reproducen las componentes sub-armónicas de 2do orden generan un pico de energía de entre 1.22 a 1.80 veces superior a aquellas que si las reproducen.
Ensayos con periodo pico igual a 3,21 s	En el sector de más baja frecuencia, entre 0.01 hz y 0.06 hz, las teorías de generación que reproducen las componentes sub-armónicas de 2do orden producen un pico de energía de entre 5 a 7 veces el pico de energía de las teorías que no lo hacen.
	Entre las frecuencias 0.06 hz y 0.16 hz, las teorías que no reproducen las componentes sub-armónicas de 2do orden generan un pico de energía de entre 1.18 a 1.73 veces superior a aquellas que si las reproducen.

Se observa también que para ambos casos (periodo pico igual a 2.17 s y 3.21 s) existen dos pico de energía de baja frecuencia que a su vez parecen estar ubicadas en frecuencias múltiplo. Para el caso de los ensayos con periodo pico igual a 2.17 s, en la zona cercana al segundo pico de baja frecuencia, centrado en 0.2 hz aprox., no se observan diferencias significativas.

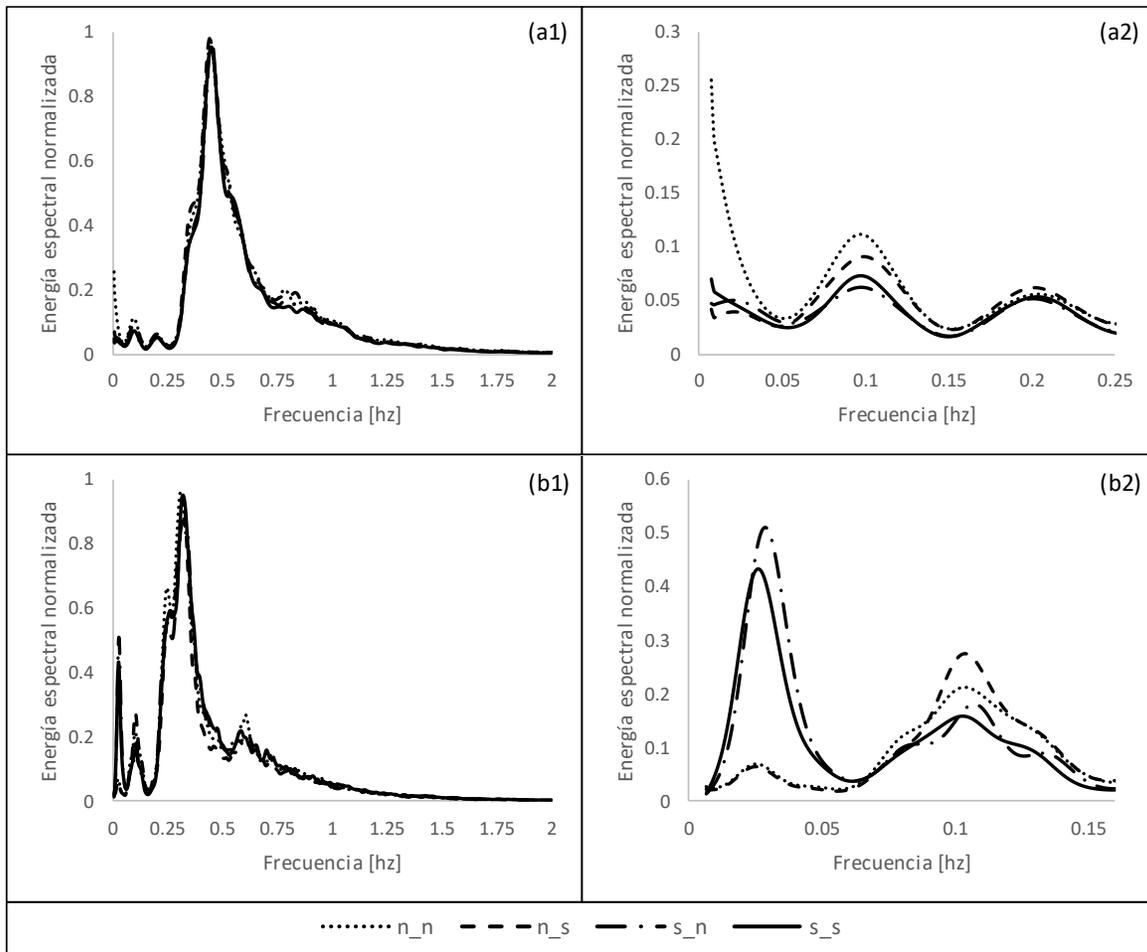


Figura 5. Energía espectral normalizada y promediada para los ensayos duplicados y de distintas alturas de oleaje característico. (a1) Espectro completo, ensayos con periodo pico de 2.17 s; (a2) Acercamiento al sector de baja frecuencia de los espectros obtenidos en ensayos con periodo pico de 2.17 s; (b1) Espectro completo, ensayos con periodo pico de 3.21 s; (b2) Acercamiento al sector de baja frecuencia de los espectros obtenidos en ensayos con periodo pico de 3.21 s.

4. CONCLUSIONES

La teoría de generación de oleaje es importante a la hora de evaluar el sobrepaso del oleaje en modelación física. A pesar de la dispersión de los resultados, para el caso de estudio (defensa costera de Av. Perú, en el canal de olas del Instituto Nacional de Hidráulica), se obtuvo diferencias consistentes respecto a las mediciones de caudal de sobrepaso. Suponiendo que la teoría de generación de oleaje de 2do orden reproduce de forma más precisa las condiciones de simulación, se puede llegar a sobreestimar el caudal de sobrepaso medio en hasta un 90% aproximadamente al usar teoría de 1er orden.

El método de generación de fase aleatoria utilizado en este trabajo, proporciona cada vez que se aplica, series de tiempo distintas, aun manteniendo todos los parámetros y teoría de generación constantes. Las diferencias en las series de tiempo no se reflejan significativamente en los descriptores estadísticos o espectrales clásicos del oleaje, a excepción de la altura máxima (H_{max}).

Las diferencias en las series de tiempo de los ensayos duplicados explican la dispersión de los resultados.

El análisis de los espectros de oleaje en la zona cercana a la defensa costera muestra diferencias importantes entre las distintas teorías de generación. Estas diferencias ocurren principalmente en la zona sub-armónica y se agrupan en dos sectores del espectro, entre 0.01 hz y 0.05 hz, y entre 0.05 hz y 0.15 hz aproximadamente. Cada uno de estos sectores caracterizado por picos de energía ubicadas en frecuencias múltiplo. Estos picos de energía pueden tener una diferencia de hasta 7 veces su valor, dependiendo de la teoría de generación de oleaje.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la valiosa colaboración de:

- Gubbler Otarola Bello, Oceanógrafo del Instituto Nacional de Hidráulica por la ejecución de la mayoría de los ensayos en modelo físico realizados para este trabajo.
- Jorge Huerta, por su apoyo indispensable en la calibración de las sondas de oleaje, limpieza y mantención del canal de olas, sus obras, equipos e instrumentos.

REFERENCIAS

Barthel, V., E.P.D. Mansard, S.E. Sand, F.C. Vis. 1983. Group bounded long waves in physical models. Ocean Engng, Vol. 10, No. 4, pp. 261-294.

Hughes, S.A. 1993. Physical models and laboratory techniques in coastal engineering, volume 7 of advanced series on ocean engineering. World Scientific.

INH. 2016. Diseño conservación defensa costera sectores av. Perú y Juan de Saavedra, Etapa 2.

Sand, S.E., y E.P.D. Mansard. 1986. Reproduction of Higher Harmonics in Irregular Waves. Ocean Engng, Vol. 13, No. 1, pp. 57-83.