SIOP 2026 | COQUIMBO XI Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria

XI SEMINARIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA Y OPERACIÓN PORTUARIA

GENERACIÓN Y CALIBRACIÓN DE OLEAJE EN MODELOS FÍSICOS COSTEROS: CRITERIOS PRÁCTICOS Y LECCIONES DERIVADAS DE TRES CASOS DE ESTUDIO

ANDRÉS MENDOZA MUNIZAGA[1], ÁLVARO ÁLVAREZ VÁSQUEZ[1], BEATRIZ RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ[1], ANTONIO TOMÁS SAMPEDRO[1]

RESUMEN

La correcta reproducción del oleaje es fundamental en los ensayos de modelación física costera y portuaria. La calibración no debe limitarse a reproducir parámetros globales como la altura de momento de orden cero H_{m0}, la altura de ola significativa H_s y el periodo peak T_p, especialmente cuando las componentes no lineales o la transformación posterior del oleaje resultan relevantes.

Se presentan tres casos desarrollados en tres instalaciones del IHCantabria. En el canal CoCoTsu, una comparación controlada muestra que la incorporación de la corrección superarmónica (SH) modifica de forma identificable la componente superarmónica ligada en torno a $2f_p$, manteniendo comparable la componente primaria. En el tanque 3D TOD, el modelo presenta un programa completo de condiciones de elevada no linealidad y restricciones geométricas para la calibración. En el gran tanque CCOB, el modelo representa condiciones de menor no linealidad en la sección offshore, seguidas de una extensa zona de propagación y transformación.

Los casos muestran que el parámetro de no linealidad S resulta útil para diagnosticar el régimen no lineal y evaluar la aplicabilidad de determinadas teorías, pero no determina por sí mismo la estrategia de generación. La escala, la instalación, las capacidades del sistema de generación, la absorción y la propagación deben considerarse conjuntamente, teniendo como referencia final las características del oleaje que deben reproducirse en la zona de interés.

Palabras clave: modelación física; generación de oleaje; oleaje no lineal; segundo orden; calibración.

---

[1] Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria IHCantabria, España. andres.mendoza@unican.es

1 INTRODUCCIÓN

La modelación física continúa siendo una herramienta fundamental en el análisis de estructuras y procesos costeros cuando fenómenos como la rotura, el rebase, la reflexión o las interacciones ola-estructura hacen necesaria una representación directa de los procesos hidráulicos. Su utilidad depende, sin embargo, de que las condiciones reproducidas en laboratorio representen adecuadamente las condiciones relevantes para el problema estudiado.

En ensayos con oleaje irregular, la reproducción de H_{m0}, H_s y T_p constituye normalmente un primer criterio de calibración, pero puede resultar insuficiente cuando la estructura espectral o las interacciones no lineales influyen sobre la respuesta analizada. Una teoría de generación utilizada fuera de su rango de aplicabilidad puede producir componentes libres espurias que se propagan de manera diferente a las componentes ligadas. Estudios previos han mostrado que la utilización de teorías de primer y segundo orden puede modificar procesos como el *run-up*, el rebase o la posición de rotura (Eldrup y Lykke Andersen, 2019a).

No existe, sin embargo, una estrategia de generación universal. La decisión depende de las características del oleaje, la profundidad, las componentes relevantes para el fenómeno estudiado, la escala, las capacidades de generación y absorción y la transformación posterior dentro del modelo.

Este trabajo analiza tres experiencias desarrolladas en instalaciones de IHCantabria con configuraciones y objetivos diferentes. No se pretende establecer una regla única de generación, sino extraer criterios prácticos para abordar una pregunta común al diseño experimental:

¿Qué características del oleaje deben reproducirse finalmente en la zona de interés?

2 CRITERIOS PRÁCTICOS PARA LA GENERACIÓN Y CALIBRACIÓN DE OLEAJE

La definición de una estrategia de generación y calibración requiere considerar conjuntamente las características objetivo del oleaje, su grado de no linealidad y las capacidades de la instalación experimental. En esta sección se resumen los criterios empleados posteriormente en los casos de estudio, incluyendo la reproducción espectral, las componentes de segundo orden, el parámetro de no linealidad S y las limitaciones asociadas a la generación y absorción.

2.1 Reproducción del oleaje

Un estado de mar irregular se caracteriza mediante parámetros globales como H_{m0}, H_s y T_p, además de su distribución espectral y, cuando corresponda, direccional. A partir del espectro objetivo se sintetiza una realización temporal que, mediante las funciones de transferencia correspondientes, se transforma en el movimiento del generador.

La calibración debe verificar aquellas características del oleaje relevantes para el objetivo experimental. Además de los parámetros globales, puede requerir el análisis del espectro, la

reflexión, la direccionalidad o las componentes no lineales. Cuando existe reflexión significativa, puede resultar además necesario caracterizar la componente incidente para evitar que la energía reflejada distorsione la evaluación del oleaje generado.

2.2 Componentes de segundo orden

En oleaje irregular, las interacciones entre dos componentes primarias de frecuencias f_n y f_m originan componentes de segundo orden cuyas frecuencias vienen determinadas por:

$$f_{nm}^{+} = f_n + f_m \quad ; \quad f_{nm}^{-} = |f_n - f_m| \tag{1}$$

donde:

f_n y f_m son las frecuencias de las dos componentes primarias que interactúan;

n y m identifican dichas componentes dentro del espectro;

f_{nm}^{+} es la frecuencia correspondiente a la interacción de suma;

f_{nm}^{-} es la frecuencia correspondiente a la interacción de diferencia.

Las interacciones de suma producen componentes superarmónicas, mientras que las de diferencia generan componentes subarmónicas o de onda larga. Estas componentes pueden permanecer ligadas al oleaje primario (*bound*) o propagarse libremente (*free*).

La presencia de una componente libre no implica necesariamente una generación espuria, ya que procesos físicos como la rotura o las variaciones de profundidad pueden liberar energía previamente ligada. No obstante, también pueden generarse componentes libres espurias cuando la teoría utilizada por el generador no satisface adecuadamente las condiciones de contorno asociadas a la no linealidad del oleaje.

Dentro de su rango de aplicabilidad, la teoría de generación de segundo orden permite reproducir las componentes ligadas correspondientes y reducir la generación de componentes libres espurias asociadas a una generación exclusivamente de primer orden (Schäffer, 1996). Las correcciones superarmónicas (SH) y subarmónicas o de onda larga (LW) corresponden, respectivamente, a las interacciones de suma y diferencia descritas anteriormente.

2.3 El parámetro de no linealidad S

Schäffer (1996) introdujo el parámetro de no linealidad S para evaluar la aplicabilidad de la teoría de generación:

$$S = 2|H \cdot G_{nm}^{\pm}| \tag{2}$$

Donde H es la altura de ola característica y $G_{nm}^{\pm}$ es la función de transferencia de segundo orden de la elevación de la superficie asociada a las interacciones de suma (+) o diferencia (−) entre las componentes *n* y *m*. Para su aplicación a oleaje irregular, Schäffer propone utilizar una altura de ola característica y evaluar la función de transferencia considerando $f_n = f_m = f_p$.

El significado físico de S puede interpretarse también mediante la relación entre las amplitudes de primer y segundo orden:

$$S = 4\frac{a^{(2)}}{a^{(1)}} \quad (3)$$

donde $a^{(1)}$ y $a^{(2)}$ representan las amplitudes de primer y segundo orden, respectivamente. De esta relación se deduce que S=1 corresponde a una amplitud de segundo orden equivalente al 25 % de la amplitud primaria.

Eldrup y Lykke Andersen (2019a) generalizaron posteriormente la formulación para oleaje irregular y, en sus ensayos, adoptaron de forma conservadora una altura característica $H=2H_{m0}\approx H_{max}$. En los Casos 1 y 2, S se evaluó siguiendo este criterio, adoptando $H=2H_{m0}$ y $f_n = f_m = f_p$. En el Caso 3, cuyas condiciones se definieron mediante Hs, se utilizó de forma análoga $H=2H_s$, manteniendo $f_n = f_m = f_p$.

A partir de sus ensayos con oleaje irregular, Eldrup y Lykke Andersen (2019a) proponen como referencia aproximada una aplicabilidad de la generación de primer orden hasta S≤1.2 y de la teoría convencional de segundo orden hasta valores próximos a S≤2. Estos valores son orientativos y no deben interpretarse como límites universales.

En este trabajo, S se utiliza como herramienta de diagnóstico del grado de no linealidad y de la aplicabilidad de la teoría, no como criterio automático para seleccionar SH, LW o ambas.

2.4 Generación, absorción y capacidad de las instalaciones

Las correcciones SH y LW pueden incorporarse de forma independiente según las componentes de segundo orden que se pretenda reproducir. Su aplicación debe ser compatible con las capacidades mecánicas del generador, incluyendo carrera, velocidad y aceleración. Las componentes de onda larga pueden resultar especialmente exigentes en términos de desplazamiento de la pala y hacen relevante la capacidad de absorción frente a reflexiones de baja frecuencia. Por tanto, la selección de SH, LW o ambas debe considerar conjuntamente las componentes que se pretende reproducir, el objetivo experimental, la teoría de generación y las capacidades de generación y absorción de la instalación.

3 APLICACIÓN EN TRES CASOS DE ESTUDIO

Por razones de confidencialidad, los casos de estudio se presentan de forma anonimizada, manteniendo únicamente la información técnica necesaria para describir las condiciones experimentales y sustentar el análisis realizado.

Los casos se desarrollaron en tres instalaciones con características diferentes: el Canal de Oleaje, Corrientes y Tsunamis (CoCoTsu, Figura 1), el Tanque de Oleaje Direccional (TOD, Figura 2) y el Cantabria Coastal & Ocean Basin (CCOB, Figura 3). El Caso 1 permite analizar de forma controlada la corrección superarmónica; el Caso 2 representa un programa completo de elevada no linealidad y con restricciones geométricas de calibración; y el Caso 3 permite analizar un programa de menor no linealidad offshore seguido de una extensa zona de transformación.

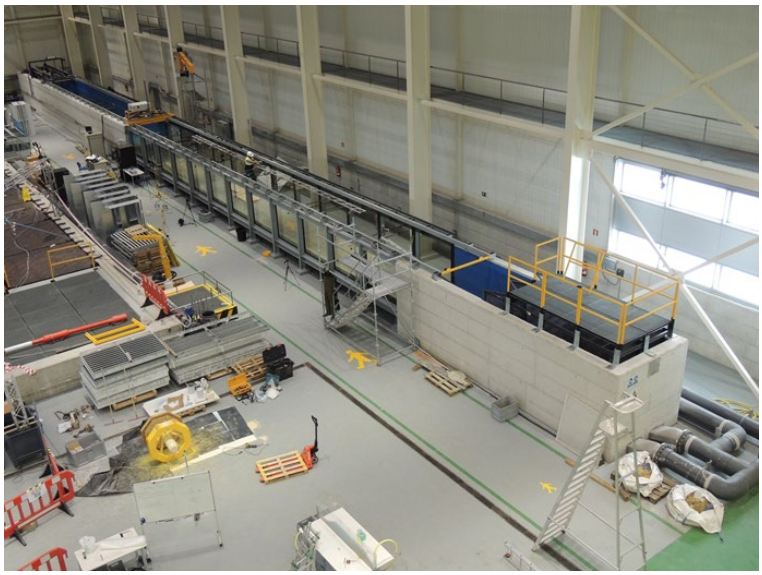


Figura 1: Canal de Oleaje, Corrientes y Tsunamis COCoTsu. Instalación Caso 1.



Figura 2: Tanque de Oleaje Direccional - TOD. Instalación Caso 2.

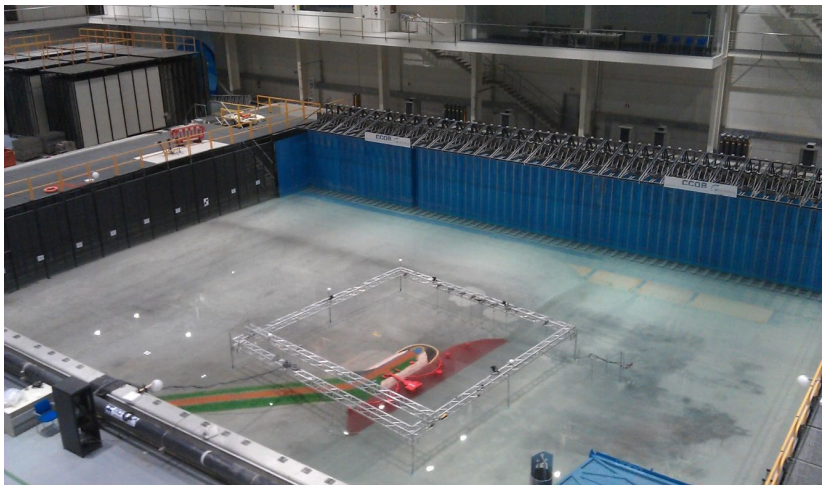


Figura 3: Cantabria Coastal & Ocean Basin – CCOB. Instalación Caso 3.

3.1 Canal de Oleaje, Corrientes y Tsunamis – COCoTsu. Caso 1.

El Caso 1, consistente en un dique en talud, se desarrolló en el CoCoTsu, canal de 56 m de longitud y 2 m de ancho equipado con un generador tipo pistón con absorción activa y una carrera máxima de 2 m. El modelo se construyó a escala 1:18, con profundidades de 1.4 m frente a la pala y 1.054 m en la zona de ensayo, equivalentes a 25.2 y 18.97 m a escala prototipo.

En el programa de ensayos se utilizó un espectro JONSWAP con un parámetro de acentuación γ=3.3, adoptado como parámetro de la definición espectral de las condiciones de ensayo. Como prueba específica de generación se seleccionó una condición con H_{m0}=7 m y T_p=17.91 s, correspondientes a H_{m0}=0.389 m y T_p=4.2 s en modelo. Para esta condición se obtienen S_{pala}=2.97 y S_{ref}=5.07, evaluando la misma condición con las profundidades frente al generador y en la zona de ensayo, respectivamente. Ambos valores son superiores al límite orientativo S=2 considerado por Eldrup y Lykke Andersen (2019a) para la aplicabilidad de las formulaciones convencionales de segundo orden.

Se generaron dos señales de 1100 olas con la misma condición objetivo y la misma realización aleatoria, manteniendo activa la absorción y LW desactivada, de modo que la única diferencia fue la incorporación de SH. La frecuencia peak es $f_p \simeq 0.237$ Hz, por lo que las interacciones superarmónicas próximas al peak se sitúan alrededor de $2f_p \simeq 0.474$ Hz.

Las componentes primarias, los armónicos ligados y el espectro total del oleaje incidente (Primary, Bound y Total; Figura 4) se obtuvieron mediante el análisis no lineal de reflexión implementado en el software WaveLab, de la Universidad de Aalborg. El análisis está basado en la metodología de separación de componentes incidentes y reflejadas, ligadas y libres descrita por Eldrup y Lykke Andersen (2019b).

El análisis muestra que la activación de SH incrementa de forma identificable la densidad espectral de la componente superarmónica ligada (Bound) en torno a $2f_p$, mientras que la componente primaria permanece comparable. La densidad espectral de Bound puede superar localmente a la de Total, ya que las componentes separadas mantienen relaciones de fase y sus densidades espectrales no son aditivas punto a punto; este comportamiento no debe interpretarse como una energía de la componente ligada superior a la del oleaje total. El incremento observado de la componente ligada es coherente con la incorporación del movimiento de pala de segundo orden asociado a las interacciones de suma descritas por Schäffer (1996).

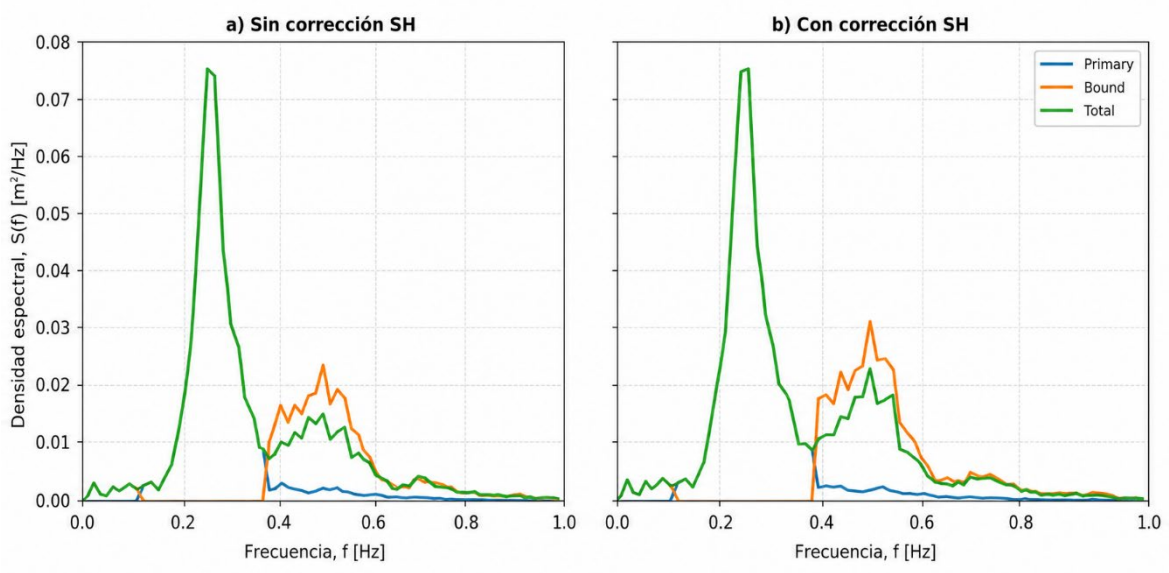


Figura 4. Componentes primarias (Primary), armónicos ligados (Bound) y Total del espectro incidente obtenidas sin corrección SH y con corrección SH para la condición exploratoria del Caso 1. Valores modelo.

El caso constituye la comparación experimental más directamente controlada del trabajo y demuestra que la incorporación de SH modifica la estructura de segundo orden del oleaje generado. Dado el elevado valor de S, este efecto no debe interpretarse por sí mismo como una mejora de la reproducción, sino como el efecto experimental de aplicar la corrección SH fuera del rango aproximado de aplicabilidad de la formulación convencional de segundo orden.

3.2 Tanque de Oleaje Direccional – TOD. Caso 2.

El modelo del Caso 2 se desarrolló en el TOD, instalación de 28 m de longitud, 8.6 m de ancho y hasta 1.2 m de profundidad, equipado con diez palas independientes y absorción activa tridimensional.

El modelo, que contemplaba el estudio de estabilidad de un espigón de retención de arena, incluyendo una batimetría de la zona de estudio, se construyó a escala 1:38.7. Se consideraron las condiciones de oleaje, las dimensiones requeridas, las capacidades de generación y la disponibilidad de unidades especiales con dimensiones y pesos previamente definidos. La escala resultó así de un compromiso entre similitud física, capacidad experimental y restricciones constructivas.

Las condiciones se reprodujeron mediante espectros JONSWAP con γ=5, con H_{m0} entre 2.6 y 4.5 m, periodos peak entre 16 y 22 s, con profundidades al pie de pala entre 12 y 16 m a escala prototipo. El oleaje se generó sin dispersión direccional, es decir, con oleaje de cresta larga. Para el conjunto del programa, los valores del parámetro no lineal estaban entre $2.90 \leq S \leq 8.16$.

Todas las condiciones presentan S>2, superando el rango aproximado de aplicabilidad señalado por Eldrup y Lykke Andersen (2019a) para las formulaciones convencionales de segundo orden. La elevada no linealidad constituye, por tanto, una característica general del programa.

La influencia de la profundidad relativa se observa para tres condiciones con idénticos H_{m0}=3.75 m y T_p=19.6 s. Para profundidades de 12, 14.4 y 16 m se obtienen respectivamente S=7.79, 5.46 y 4.45.

Como diagnóstico complementario, las condiciones se representaron sobre el diagrama de rangos de aplicación de teorías de onda presentado por Komar (1976), definido mediante la altura de ola relativa a la profundidad H/h vs la profundidad relativa a la longitud de onda h/L. Utilizando $H=H_{m0}$ y $L=L_p$, la profundidad relativa está entre 0.056 y 0.076, mientras que la altura de ola relativa se encuentra entre 0.19 y 0.31.

El diagrama se utiliza únicamente como referencia orientativa, dado que sus regiones corresponden a ondas periódicas y los ensayos reproducen estados de mar irregulares.

El array de calibración se situó aproximadamente a 5 m del sistema de generación e inmediatamente antes del inicio de la batimetría. Las longitudes de onda asociadas al periodo peak variaron entre 4.61 y 6.62 m en modelo, resultando la relación entre distancia al array y las longitudes peak entre $0.76 \leq x/L_p \leq 1.09$.

La geometría condicionaba así el espacio disponible para caracterizar el oleaje antes de iniciar su transformación sobre la batimetría, sin que esta proximidad implique por sí misma una deficiencia en la generación.

Durante la calibración se evaluaron señales con LW y combinaciones SH+LW. Al corresponder a realizaciones aleatorias diferentes, no permiten aislar el efecto de SH como en el Caso 1. En la campaña definitiva se utilizó LW con absorción activa y no se incorporó SH. Esta configuración constituye una decisión experimental adoptada en el Caso 2 y no una consecuencia automática del valor de S.

El Caso 2 muestra que, cuando todo el programa presenta elevada no linealidad, la estrategia debe definirse considerando conjuntamente el diagnóstico mediante S, el régimen de oleaje y las restricciones de la instalación.

3.3 Cantabria Coastal & Ocean Basin – CCOB. Caso 3.

El tercer caso corresponde a un modelo tridimensional desarrollado para analizar alternativas de protección frente a inundaciones, considerando una batimetría, muros verticales y soluciones mixtas. El modelo se construyó a escala 1:60 en el CCOB, instalación con un área de ensayo aproximada de 32 × 24 m y 64 palas independientes con absorción activa tridimensional, pudiendo alcanzar la profundidad de 3.5 m.

La extensión del modelo permitió reproducir una amplia zona batimétrica entre la referencia offshore y el frente costero y analizar la transformación progresiva del oleaje antes de alcanzar la zona de interés.

Las condiciones se especificaron y calibraron en la batimétrica de −50 m mediante espectros TMA con γ=3.3, utilizando H_s como parámetro objetivo. En consecuencia, para la evaluación de S en este caso se utilizó Hs como altura significativa de referencia. Para el conjunto considerado, con Tp=12 s, profundidades entre 51 y 52.3 m y Hs entre 3.46 y 7.8 m, se obtuvieron valores de S entre 0.29 y 0.67.

Todos los valores obtenidos son inferiores a la referencia orientativa S=1.2 propuesta por Eldrup y Lykke Andersen (2019a) para la generación de primer orden, situándose el Caso 3 en un régimen de no linealidad claramente inferior al Caso 2.

Como diagnóstico complementario, utilizando $H=H_s$, las condiciones presentan aproximadamente una profundidad relativa h/Lp entre 0.248 y 0.253 y una altura relativa H/h entre 0.066 y 0.153.

Su representación sobre el diagrama de Komar (1976), incluida posteriormente junto con las condiciones del Caso 2, permite visualizar el contraste entre ambos programas.

A pesar de los reducidos valores de S, la estrategia de generación incorporó LW, mientras que SH permaneció desactivada. La corrección LW se utilizó para reproducir las componentes subarmónicas antes de su propagación y transformación sobre la batimetría física. No se dispone de una condición equivalente generada sin LW que permita aislar su efecto, por lo que el caso no demuestra experimentalmente una mejora producida por dicha corrección.

Su interés reside en mostrar que la selección de la estrategia no debe depender exclusivamente del grado de no linealidad en la sección de generación o calibración. En este caso, la posterior propagación sobre una batimetría extensa formó también parte del planteamiento experimental.

4 CRITERIOS PRÁCTICOS Y LECCIONES DERIVADAS DE LOS CASOS DE ESTUDIO

Los tres casos presentan objetivos y configuraciones diferentes y no constituyen una comparación experimental homogénea. El Caso 1 proporciona una comparación controlada de estrategias de generación, mientras que los Casos 2 y 3 documentan decisiones experimentales adoptadas bajo condiciones y restricciones diferentes. Su análisis conjunto permite identificar criterios comunes para la selección de la estrategia de generación y calibración.

4.1 La no linealidad diagnostica el problema, pero no determina la estrategia

Los casos representan situaciones muy diferentes respecto al parámetro S. El Caso 1 alcanza S=2.97 frente al generador y S=5.07 al evaluar la misma condición con la profundidad de la zona de ensayo. En el Caso 2, todas las condiciones presentan S>2, con valores entre 2.9 y 8.16. Por el contrario, el programa del Caso 3 presenta valores comprendidos entre 0.29 y 0.67.

Esta diferencia se aprecia también al representar los Casos 2 y 3 sobre el diagrama de rangos de aplicación de teorías de onda de Komar (1976). El Caso 2 se concentra en valores bajos de h/Lp y elevados de altura relativa, mientras que las condiciones offshore del Caso 3 ocupan una región de mayor profundidad relativa y menor altura relativa.

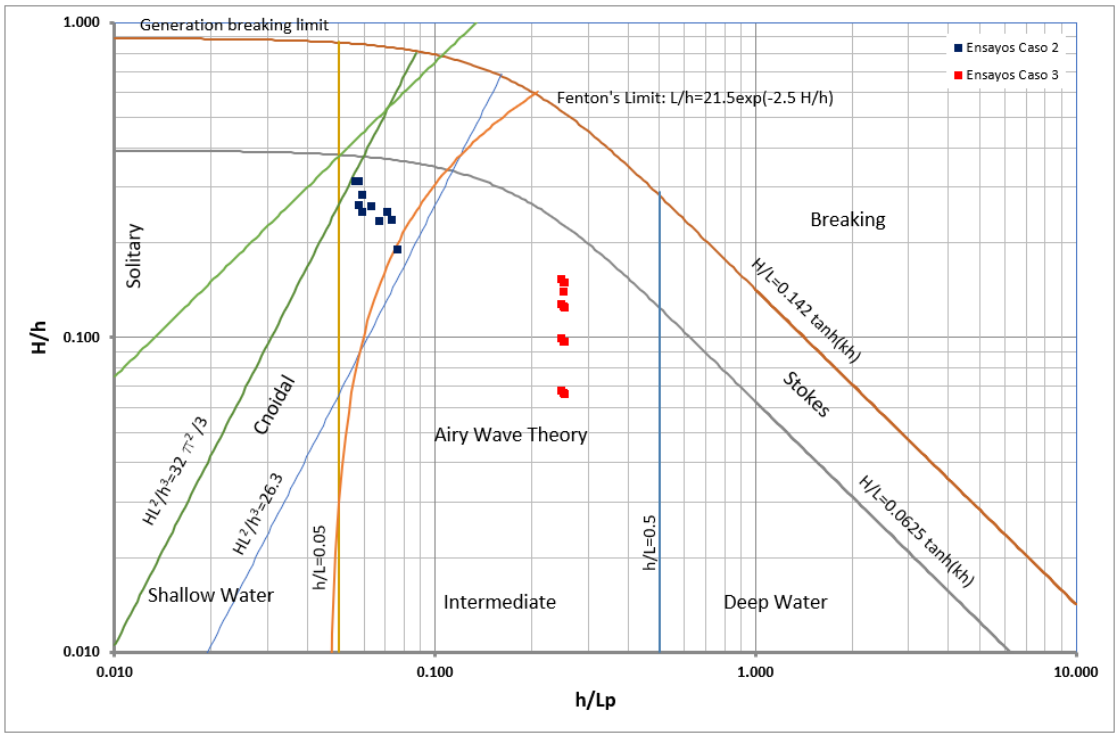


Figura 5: Condiciones de oleaje de los Casos 2 y 3 (azul y rojo), representadas sobre el diagrama de rangos de aplicación de teorías de onda. Diagrama base adaptado de Komar (1976). Fuente: Elaboración propia.

Para el Caso 2 se utiliza $H=H_{m0}$ y para el 3, $H=H_s$, de acuerdo con la altura significativa utilizada como referencia de calibración en cada proyecto. La representación tiene carácter orientativo.

A pesar del marcado contraste entre ambos programas, la estrategia de generación no puede deducirse automáticamente de S. El Caso 1 permite demostrar experimentalmente el efecto de incorporar SH; El Caso 2 utilizó finalmente LW sin SH bajo condiciones de S>2; y el Caso 3 incorporó LW aun presentando S<1. Estas dos últimas configuraciones corresponden a decisiones experimentales adoptadas en los casos y no a demostraciones comparativas de superioridad.

Por tanto, S debe utilizarse como herramienta de diagnóstico del grado de no linealidad y de la aplicabilidad de la teoría, pero no como criterio automático para decidir la incorporación de SH o LW.

4.2 Escala, instalación y calibración

Frostick et al. (2011) señalan que la selección de la escala en un modelo físico debe considerar, entre otros factores, las condiciones de oleaje de diseño, las capacidades del sistema de generación, las dimensiones de la instalación y la disponibilidad y dimensiones de los elementos del modelo. El Caso 2 ilustra especialmente esta interacción: la escala 1:38.7 estuvo condicionada por las condiciones de oleaje, las capacidades de generación y la disponibilidad de unidades especiales, mientras que la geometría situó la sección de calibración entre aproximadamente 0.76 y 1.09 L_p del generador e inmediatamente antes del inicio de la batimetría.

Por tanto, la escala, la instalación, la estrategia de generación y las restricciones constructivas deben considerarse conjuntamente dentro del diseño experimental.

4.3 La zona de interés como referencia final

La condición generada o calibrada en una determinada sección no permanece necesariamente inalterada durante su propagación. Los cambios de profundidad pueden modificar la altura, la asimetría y la estructura espectral mediante asomeramiento, interacciones no lineales, rotura y transformación entre componentes ligadas y libres.

Los tres casos ilustran esta dependencia espacial. En el Caso 1, una misma condición conduce a valores diferentes de S al considerar las profundidades frente a la pala y en la zona de ensayo. En el Caso 2, la calibración se realiza inmediatamente antes del inicio de la transformación batimétrica. En el Caso 3, por el contrario, una condición caracterizada offshore debe propagarse sobre una amplia batimetría antes de alcanzar el frente costero.

La pregunta que debe guiar el diseño experimental es, por tanto:

¿Qué características del oleaje deben reproducirse finalmente en la zona de interés o estudio?

Su respuesta condiciona la calibración, la escala, la instalación y la estrategia de generación. La generación debe considerarse parte del diseño físico del modelo y no únicamente una configuración posterior del sistema de control.

5 CONCLUSIONES

La reproducción de parámetros globales de altura y periodo constituye un requisito básico de calibración, pero puede resultar insuficiente cuando la estructura no lineal del oleaje o su transformación posterior son relevantes para el proceso estudiado. Dentro de su rango de aplicabilidad, las formulaciones de segundo orden permiten reproducir componentes ligadas y reducir determinadas componentes libres espurias, pero la selección entre generación de primer orden, SH y LW no responde a una regla única.

Los tres casos analizados muestran situaciones complementarias. El Caso 1 permite comprobar de forma controlada que la incorporación de SH modifica las componentes superarmónicas ligadas manteniendo comparable la componente primaria. En el Caso 2, todas las condiciones presentan $2.90 \leq S \leq 8.16$, evidenciando un programa de elevada no linealidad y situado por encima del rango aproximado de aplicabilidad de las formulaciones convencionales de segundo orden. En el Caso 3, por el contrario, las condiciones offshore presentan $0.29 \leq S \leq 0.67$, aunque la estrategia adoptada incorporó LW antes de una extensa zona de propagación y transformación.

El contraste entre los casos confirma que el parámetro S constituye una herramienta útil para diagnosticar el grado de no linealidad y evaluar la aplicabilidad de determinadas teorías, pero no determina por sí mismo la estrategia de generación. La decisión debe considerar también el objetivo del estudio, las características del oleaje que se pretende reproducir, la ubicación de la zona de interés, la propagación dentro del modelo y las capacidades y restricciones de la instalación experimental.

Los casos muestran además que la selección de la escala, la instalación, las capacidades del sistema de generación, las restricciones físicas de construcción y la estrategia de ensayos forman parte de un proceso iterativo y mutuamente condicionado. La Figura 6 sintetiza este planteamiento.



Figura 6: Síntesis conceptual del diseño experimental integrado de un modelo físico. Fuente: Elaboración propia.

En consecuencia, la generación de oleaje no debe considerarse una configuración posterior e independiente del diseño del modelo físico. La estrategia experimental debe definirse de forma integrada con el objetivo del estudio, la escala, las características de la instalación y las restricciones físicas, teniendo como referencia final las características del oleaje que deben reproducirse adecuadamente en la zona de interés.

6 REFERENCIAS

Eldrup, M.R. y Lykke Andersen, T. (2019a). Applicability of nonlinear wavemaker theory. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(1), 14.

Eldrup, M.R. y Lykke Andersen, T. (2019b). Estimation of Incident and Reflected Wave Trains in Highly Nonlinear Two-Dimensional Irregular Waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 145(1), 04018038.

Frostick, L.E., McLelland, S.J. y Mercer, T.G. (Eds.) (2011). *Users Guide to Physical Modelling and Experimentation: Experience of the HYDRALAB Network*. IAHR Design Manual.

Komar, P.D. (1976). *Beach Processes and Sedimentation*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Schäffer, H.A. (1996). Second-order wavemaker theory for irregular waves. *Ocean Engineering*, 23, 47–88.