

**XXIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRAULICA  
CARTAGENA DE INDIAS, COLOMBIA, SEPTIEMBRE 2008**

**MEDICIÓN DE OLAS EN EMBALSES**

***Roberto Daniel CASTELLANO \**, *Gabriel TATONE \*\****

\* Jefe Programa Hidráulica Marítima, \*\* Jefe Programa Instrumentación  
INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA  
Buenos Aires – Argentina  
[rcastell@ina.gov.ar](mailto:rcastell@ina.gov.ar) [gtatone@ina.gov.ar](mailto:gtatone@ina.gov.ar)

**RESUMEN**

La caracterización de olas en embalses es de interés para permitir evaluar su influencia sobre las márgenes del lago, sobre las estructuras propias de la represa, o sobre la eventual navegación en las aguas del embalse.

El objetivo de este trabajo es mostrar la experiencia ganada en la medición de olas en embalses y presentar las pautas generales sobre las cuales se apoyó la selección de la técnica de medición, registro y procesamiento de datos.

**ABSTRACT**

The characterization of wind generated waves in dams and reservoirs is of concern to evaluate the response of structures to wave action, the behaviour of the banks, or navigation conditions in the artificial lake.

The aim of this paper is to show the experience gained in the measurement of wind waves in reservoirs, and to describe the general guidelines for the selection of a suitable wave gauge, recording and signal processing.

**PALABRAS CLAVE:** Embalses - olas - olígrafos.

## INTRODUCCION

Una represa implica la existencia de un cuerpo artificial de agua, de variada extensión y geometría, sobre cuya superficie la acción del viento tiene la posibilidad de generar olas. La caracterización de esas olas es de interés para permitir evaluar su influencia sobre las márgenes del lago, sobre las estructuras propias de la represa, o sobre la eventual navegación en las aguas del embalse.

La medición de olas en embalses está incorporándose con más frecuencia dentro de los programas de verificación de riesgos de estructuras y componentes de la represa. En algunos casos las represas cuentan con taludes internos protegidos con enrocado de variada extensión que pueden resultar vulnerables a la acción del oleaje.

## OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es mostrar la experiencia ganada en la medición de olas en embalses, uno sobre el río Paraná y otro sobre el río Colorado, ambas en la República Argentina, y presentar las pautas generales sobre las cuales se apoyó la selección de la técnica de medición, registro y procesamiento de datos.

Por una parte las mediciones tienen el carácter de monitoreo de la respuesta del enrocado de protección a la acción del oleaje. Por otra parte, puesto que normalmente se dispone de información climatológica detallada en el área de la represa, y específicamente de intensidad y dirección del viento, la medición de olas tendrá el propósito de permitir validar un modelo matemático de pronóstico basado en la acción del viento, que en definitiva proporcionará series cronológicas considerablemente más extensas que la medición directa, y permitirá estimar el riesgo de daño a futuro.

## CARACTERIZACION DEL OLAJE

Las características del instrumento y la técnica de medición estarán relacionadas con las propiedades del oleaje a medir. En consecuencia se hace necesario en primera instancia estimar las propiedades generales del oleaje mediante técnicas simples, a partir de las características de los vientos en el sitio y de las características físicas del embalse.

La disponibilidad de modelos paramétricos de oleaje permite una primera aproximación a la estimación de la altura y el período medio de las olas desarrolladas por un viento de determinada intensidad que sopla sobre una distancia determinada (Fetch), sobre un cuerpo de agua con profundidad conocida.

El espectro de densidad de energía  $S(f)$  es una representación en el dominio de la frecuencia  $f$ , de la energía contenida en el oleaje. La hipótesis básica es que en cada intervalo  $\Delta f$  existen ondas de distinta amplitud  $a_n$ . Puesto que la energía transportada por la onda es proporcional al cuadrado de su amplitud, la densidad de energía (energía por unidad de frecuencia) se expresa como (Goda, 1977):

$$S(f) = \frac{1}{\Delta f} \sum \frac{1}{2} a_n^2 \quad [1]$$

Sobre la base de una gran cantidad de mediciones de olas, se han formulado diversos modelos empíricos para la estructura del espectro de densidad de energía que expresan  $S(f)$  en función de la

velocidad del viento a 10 m de altura  $U_{10}$  y de la distancia sobre la cual sopla el mismo, el fetch  $F$ . En el caso del espectro JONSWAP,  $S(f)$  resulta (Goda, 1990):

$$S(f) = \frac{\alpha}{(2\pi)^4} g^2 f^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}\right] \cdot \gamma \exp\left[-\left(\frac{f}{f_p}-1\right)^2/2\sigma^2\right] \quad [2]$$

donde:

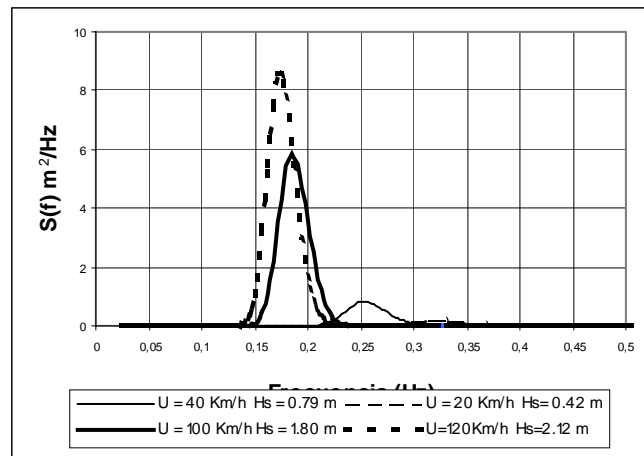
$$f_p = 3.5 \left(\frac{g}{U_{10}}\right) \left(\frac{g \cdot F}{U_{10}^2}\right)^{-0.33}, \quad \text{frecuencia del pico del espectro.}$$

$$\alpha = 0.076 \cdot \left(\frac{g \cdot F}{U_{10}^2}\right)^{-0.22}$$

$\gamma = 1$  a  $7$  coeficiente de apuntamiento del espectro, media 3.3

$\sigma = 0.07$  si  $f \leq f_p$  y  $\sigma = 0.09$  si  $f > f_p$

En la **Figura 1** se muestran algunos espectros de densidad de energía  $S(f)$  (espectro JONSWAP) para un fetch de 25 Km (típico para muchos embalses) y velocidades de viento de 20, 40, 100 y 120 Km/h. Las alturas de ola significativa resultaron de 0.42 m, 0.79 m, 1.80 m y 2.12 m respectivamente.



**Figura 1.-** Espectro JONSWAP

Particularmente la **Figura 1** muestra, para cada uno de los casos indicados, la frecuencia máxima para las que la función  $S(f)$  adquiere valores de interés práctico.

La altura significativa  $H_s$ , utilizada en ingeniería para el diseño de obras es una medida de la energía total contenida en olas aleatorias. Esta y otros parámetros espectrales, se pueden determinar a partir de los momentos de orden  $n$  de la función de densidad espectral, los que se definen como:

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n S(f) df \quad [3]$$

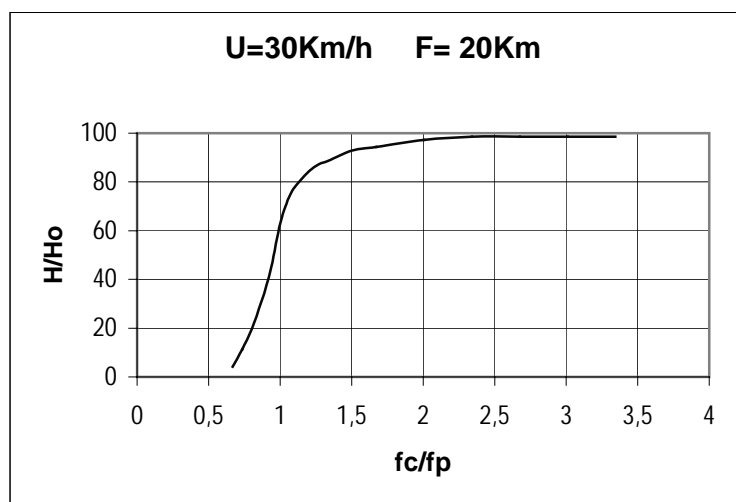
En particular la altura significativa  $H_s$  se determina a partir de la ecuación [3] con  $n = 0$ , según:

$$H_s = 4 \cdot m_0^{1/2} \quad [4]$$

En la práctica es posible definir un rango de frecuencias no infinito para resolver la integral [3], sin por ello resultar afectados en términos prácticos los resultados de [4]. Conocidas las funciones de densidad de energía probables en el embalse, esos límites servirán de referencia para fijar la respuesta en frecuencia requerida del instrumento de medición.

Como surge de la **Figura 1** en el caso de vientos de 20 Km/h y  $H_s = 0.42$  m, la máxima frecuencia que se requiere para describir adecuadamente la función de densidad espectral en una situación típica de un embalse (y por lo tanto para determinar  $H_s$ ) es del orden de 0.4 Hz, es decir equivalente a olas de 2.5 segundos de período.

En la **Figura 2** se muestra como ejemplo el caso de un cuerpo de agua de 20 Km de extensión y un viento  $U_{10}=30$  Km/h. Mediante [2], [3] y [4] se determinó que la ola generada resulta  $H_0= 0,71$  m y la frecuencia de pico 0.3 Hz. Si la estimación de  $H_s$  se efectúa para un límite superior finito de la integral [3] (frecuencia de corte  $f_c$ ), puede notarse que la integración de la función  $S(f)$  para frecuencias de corte inferiores a  $2 f_p$ , produce estimaciones de  $H_s$  afectadas de errores crecientes.



**Figura 2.-** Estimación de  $H_s$

Consideraciones de esta naturaleza permitieron establecer que es recomendable que la frecuencia de corte sea aproximadamente 2 veces la frecuencia de pico espectral estimada para el rango práctico de las olas que pueden presentarse en el embalse y calcular los parámetros característicos asociados.

Esta condición será la que defina los requisitos del instrumento en función de las características del oleaje en el embalse.

Cuando se analiza un registro temporal de la posición de la superficie libre, determinado mediante un instrumento de medición, la función  $S(f)$  es el resultado de la aplicación de la transformada rápida de Fourier (FFT) a la serie discreta de valores del registro.

El intervalo entre datos (intervalo de muestreo) y la longitud total del registro tienen una influencia determinante en la calidad o verosimilitud de los resultados del proceso. El intervalo de muestreo debe permitir que la onda más corta que se desea medir resulte caracterizada por alrededor de cinco muestras. Esto indica que será deseable que el instrumento sea capaz de muestrear con una frecuencia del orden de 5 veces la frecuencia más alta que se desea medir.

El registro debe ser lo más extenso posible siempre que pueda asegurarse que el proceso registrado sea estacionario. La duración mínima del registro debe ser tal que permita registrar en el orden de 100 a 200 olas de período medio. La aplicación de la FFT requiere que el número total de datos  $N$  a registrar sea  $N = 2^n$  ( $n = 1, 2, 3 \dots$ ).

La partición del un registro extenso en un número de bloques de menor extensión mejora la confianza del espectro determinado como el promedio de varias determinaciones, aunque reduce la resolución de cada espectro individual.

Con referencia al intervalo entre registros, los cuerpos de agua cerrados, debido a sus dimensiones, reaccionan rápidamente a los cambios en la intensidad y dirección del viento. Así, la frecuencia de mediciones debe estimarse en cada caso particular evaluando el riesgo de perder los máximos de un evento extremo.

Cuando se realiza la transformada de Fourier mediante la discretización de un registro temporal (en este caso de presiones) en  $N$  valores muestreados con un intervalo de tiempo  $\Delta t$ , el resultado de la FFT (Transformada Rápida de Fourier) es una función (en este caso densidad de energía  $S(f)$ ) de la frecuencia  $f$ , con una resolución  $\Delta f$  definida como:

$$\Delta f = \frac{1}{N \cdot \Delta t} \quad [5]$$

La amplitud de una onda contenida en un intervalo de ancho  $\Delta f$  puede ser expresada (a partir de [2]) como:

$$a = \sqrt{2 \cdot \Delta f \cdot S(f)} \quad [6]$$

Suponiendo que el procesamiento de la señal registrada, discretizada con un intervalo de muestreo de 200 ms (equivalente a una frecuencia de muestreo = 5Hz), se realiza por bloques de 512 valores, resulta  $\Delta f \cong 0.01\text{Hz}$ . De los cálculos realizados para el caso  $U_{10} = 20 \text{ Km/h}$  surge que para  $f \cong 0.4 \text{ Hz}$  resulta  $S(f) \cong 0.0227 \text{ m}^2/\text{Hz}$  y  $H = 2a \cong 0.04 \text{ m}$ .

Es decir que para definir adecuadamente el espectro y evaluar con precisión la energía total contenida para el caso indicado, será necesario que el instrumento puede detectar como mínimo olas del orden de 4 cm de altura y 0.4 Hz de máxima frecuencia ( $T = 2.5 \text{ s mín.}$ ). El ológrafo empleado reproduce fielmente olas de pequeña amplitud (resolución 4 mm) y períodos de 1 segundo.

## PRINCIPIO DE MEDICION

La medición de olas marinas es una práctica habitual que ha dado muy buenos resultados a lo largo de varias décadas. Muchos fabricantes han desarrollado diversos modelos de ológrafos para tal fin. Podemos mencionar que el ológrafo con principio de funcionamiento acelerométrico de Datawell, es un estándar mundial para la medición de altura y dirección de olas. Pero como fue diseñado para una aplicación específica, posee rangos de semiamplitud de ola de 20 m, periodos de oleaje de 1,6 a 30 s. A esto se agrega su gran tamaño (mínimo 70 cm de diámetro) e inercia asociada, lo que a priori indica que no serían adecuados para la medición de las olas generadas en embalses (de menor amplitud y menor periodo que las olas marinas).

Alternativas más recientes a los ológrafos acelerométricos, son los de principio de medición con transductores de presión. Además, de la ventaja económica se suma el desarrollo tecnológico que ha permitido el agregado de electrónica capaz de almacenar, procesar, generar estrategias de medición,

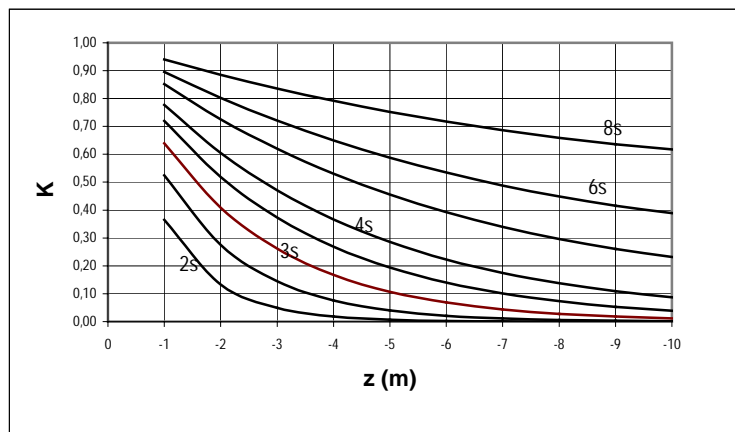
transmitir datos, etc. Como ventaja destacable para este tipo de mediciones es el tamaño reducido, la capacidad de responder a períodos de olas más pequeños y una mejor resolución de amplitudes. Habitualmente son montados en estructuras fijas sumergidas en las zonas donde se requiere realizar la medición, obteniéndose datos de altura de olas y mareas.

El principio de funcionamiento del instrumento que se ha utilizado en estos casos, es la medición de la variación de presión debida al paso de la ola  $\Delta p$  que resulta:

$$\Delta p = \rho g H \frac{\cosh(k(z+D))}{\cosh(kD)} = \rho g H K \quad [7]$$

donde  $\rho$  es la masa específica del agua,  $k=2\pi/L$  el número de onda,  $L$  = longitud de onda,  $H$  la altura de la ola,  $D$  la profundidad total del lugar y  $z$  la posición respecto de la superficie libre a la que se halla el instrumento ( $z < 0$  bajo la superficie).  $K$  resulta entonces un coeficiente que depende de  $z$ ,  $D$  y del período  $T$  de la ola a través de la longitud de onda  $L$

En la **Figura 3** se muestra la variación de  $K$  con la profundidad para varios períodos de ola.



**Figura 3.-** Coeficiente de atenuación vs profundidad

Como surge de [7] y de la **Figura 3**, para períodos cortos la variación de presión inducida por olas se atenúa rápidamente con la profundidad. La medición de  $\Delta p$  mediante el sensor de presión permite determinar  $H$  a partir de la ec. [7]. Mediante ésta, será posible establecer el requerimiento de sensibilidad del instrumento a partir de la altura de ola mínima que se requiere medir y la profundidad a la que se colocará el instrumento.

La altura mínima se deriva de la definición de densidad de energía [1]. Conociendo las frecuencias de corte, es posible establecer el valor de  $2 \cdot a_n = H$  en los extremos prácticos de la distribución espectral  $S(f)$ .

La medición de  $\Delta p$  mediante el sensor de presión permite determinar  $H$  a través de la ec. [7] como:

$$H = \frac{\Delta p}{\rho g K} = \frac{\Delta h}{K} \quad [8]$$

El instrumento utilizado provee al usuario la entrada de la densidad del líquido y la altura del instrumento respecto del lecho del embalse  $Z$ . La densidad del líquido es utilizada para convertir la indicación de presión del transductor en altura de columna de agua y  $Z$  para calcular el coeficiente

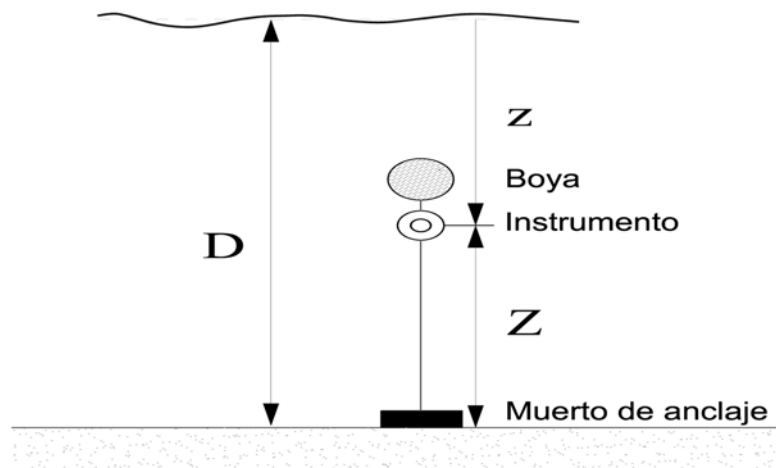
de atenuación de la acción de la ola que es función de la frecuencia. Este coeficiente  $K(n)$ , que depende de la frecuencia a través de la longitud de onda  $L$ , es utilizado para corregir los componentes del espectro a la posición de la superficie.

$$K(n) = \frac{\cosh\left(2\pi \frac{Z}{L}\right)}{\cosh\left(2\pi \frac{D}{L}\right)} \quad [9]$$

## SISTEMA DE FONDEO

En virtud de la dificultad que implica el tendido de un cable sobre el talud de la represa para la adquisición de remota de datos y la alimentación eléctrica del ológrafo, del riesgo de daño en caso de temporales y movimiento del enrocado, y teniendo en cuenta que normalmente existe un cierto grado de dificultad de acceso a los sitios de emplazamiento, se requerirá normalmente de un instrumento autónomo. La totalidad de los proveedores ofrecen la posibilidad de transmisiones telemétricas, ya sea por VHF o satélites, pero a menudo por cuestiones económicas estas soluciones son descartadas.

Cuando no se dispone de una estructura fija donde pueda adosarse el instrumento o bien ello no resultara conveniente, una alternativa es el montaje del instrumento sobre una línea que es mantenida tensa en posición vertical mediante el empuje provisto por una boya sumergida. El conjunto se mantiene fijo al fondo mediante un peso muerto de dimensiones adecuadas. En este caso el sistema se comporta como un péndulo invertido, en el que la fuerza de excitación es el arrastre que la velocidad orbital de las olas ejerce sobre el sistema, en tanto la fuerza equilibrante es la componente tangencial debida al empuje vertical provisto por la boya sumergida.



**Figura 4.-** Sistema de fondeo

La profundidad más conveniente para colocar el instrumento debe ser analizada desde dos condiciones contrapuestas. Una de ellas involucra el principio de medición, que es determinando la variación de presión debida a la ola; ésta disminuye a medida que aumenta la profundidad del instrumento y/o se reduce el período de las olas. Se requiere por ello que el instrumento se halle lo suficientemente cerca de la superficie libre particularmente para detectar ondas de corto período con la resolución adecuada. La segunda condición es el movimiento periódico u oscilación del sistema de fondeo (inducido por el oleaje), que produce lecturas de presión interpretadas como “olas”, que

depende de las características dinámicas del conjunto, de la fuerza de excitación y de la atenuación del movimiento debida al agua.

El apartamiento del instrumento de la posición vertical genera una trayectoria en arco, en cuyo extremo la profundidad  $z$  resulta incrementada en un valor  $\Delta z$  dado por:

$$\Delta z = R(1 - \cos \theta) \quad [10]$$

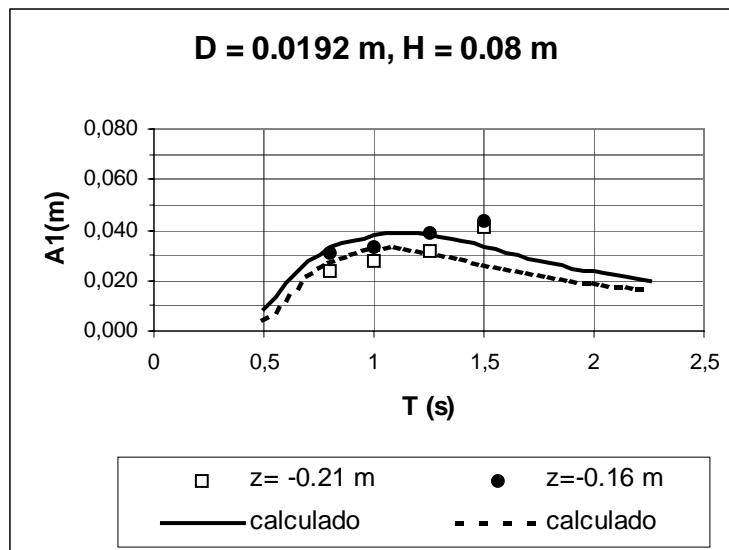
donde:  $R$  es la longitud del vínculo al muerto de anclaje  
 $\theta$  el ángulo de apartamiento desde la posición vertical

Esta variación momentánea de  $z$  es detectada y registrada por el instrumento y se traducirá en una altura de ola ficticia  $\Delta H$  a través de la relación [8].

La oscilación del sistema debe ser evaluada a los efectos de cuantificar su influencia en la medición de la altura de ola. Con este propósito se realizaron ensayos en un modelo hidráulico con los siguientes valores de las variables:

- Diámetro de la boya 0.0192 m
- Peso de la boya 0.15 gramos
- Profundidad total 0.50 m
- Profundidad de la boya 0.21 m

Los resultados se presentan en la **Figura 5**, en la que  $A1$  es el apartamiento desde la posición de reposo.



**Figura 5.-** Apartamiento medido y calculado

Puede notarse que para las características del sistema estudiado, la amplitud del movimiento aumenta con el período de las olas (la **Figura 5** corresponde a una altura de ola constante, de 0.08 m). La boya ubicada a mayor profundidad presenta un desplazamiento menor que la más superficial.

Cabe señalar que los resultados de un modelo físico resultan influidos por efectos de escala debido a la viscosidad exagerada en el modelo, y los resultados no son extrapolables linealmente a valores de prototipo. En el modelo, los bajos valores del número de Reynolds ( $Re = U \cdot d / \nu$ ) son causa de

valores mayores del coeficiente de arrastre  $C_D$  que determina la fuerza hidrodinámica actuante sobre una boya sumergida. En cambio, el empuje de la boya y el peso propio (que determinan la fuerza equilibrante del sistema) no dependen de la viscosidad y están representados en escala.

Por este motivo se aplicó un modelo matemático (Shi-igai, 1969) utilizado para describir el movimiento de una boya sumergida. El modelo resuelve la ecuación de movimiento del sistema dada por:

$$\ddot{x} + 2q \dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{1}{m + m'} \{P(t) + F(t)\} \quad [11]$$

donde

$m$ : masa de la esfera

$m'$ : masa agregada

$2q = C/(m+m')$

$C$ : coeficiente de atenuación

$x$ : distancia desde la posición de reposo

$\dot{x}$ ,  $\ddot{x}$ : derivadas primera y segunda, respecto del tiempo.

$P(t)$ : fuerza externa actuando sobre la esfera

$F(t)$  resistencia del fluido

La fuerza  $P(t)$  es la resultante de la presión externa hidrostática y ejercida por las olas, y se determina a partir de la altura de ola  $H$  y el período  $T$  de las olas. El término  $F(t)$  representa las fuerzas de resistencia del fluido que son función de la velocidad relativa entre fluido y la boya y de la viscosidad del fluido.

Para el cálculo se utilizaron para las variables los mismos valores que los del modelo físico, resultando las curvas que se indican en la **Figura 5**. Aunque existen diferencias entre valores calculados y medidos, puede apreciarse que los valores de apartamiento calculados son del mismo orden que los medidos: 30 y 40 mm para profundidades de  $-0.21$  y  $-0.16$  m respectivamente y para  $T = 1.25$  s.

Del análisis de los resultados del modelo se puede concluir que:

1. El movimiento del sistema ( $AI$ ) es menor a mayor profundidad.
2. El coeficiente de corrección  $K$  disminuye con la profundidad y esta reducción es más importante para períodos más cortos.
3. El error en altura de ola inducido por la oscilación del sistema ( $\Delta H = \Delta z/K$ ) es más sensible al aumento de la profundidad para los períodos más cortos.
4. El error inducido por la oscilación del sistema es aproximadamente independiente de la profundidad del instrumento y, para las condiciones establecidas, resulta inferior al 4% aún para las olas más altas.

## SISTEMA DE REGISTRO, ALMACENAMIENTO Y DESCARGA DE DATOS

En el caso de instrumentos autónomos, es importante la capacidad de memoria de su sistema de almacenamiento de datos (data logger), dado que de él dependerá la frecuencia de recuperación de los mismos. Dado que la calidad de la digitalización de la señal analógica depende en forma directa de la frecuencia empleada para el muestreo y la cantidad de muestras, se deberá tomar muchas muestras para representar adecuadamente las olas de menor período. Ello hace que se deba emplear

estrategias de muestreo para obtener la mínima frecuencia de recuperación de datos y la mejor calidad de información para la capacidad de la memoria disponible. Algunas de estas estrategias son:

*Detección de umbral por eventos:* El sistema comienza el muestreo una vez que se haya superado un nivel mínimo (predeterminado por el usuario). Estrategia de particular aplicación donde se requiere registrar solamente valores máximos.

*Por paquetes (burst):* En este caso el sistema es programado para registrar datos en forma cíclica (programables por el operador tanto el periodo de repetición de los ciclos como la frecuencia de muestreo y el tiempo de registro). Dentro de esta alternativa, instrumentos más modernos, incorporan la versión multi-modo, ello consiste en programar en forma independiente dos ciclos autónomos de muestreo que operarán simultáneamente en el mismo instrumento. En cada ciclo se permite el control de la frecuencia de muestreo, el periodo de repetición de cada ciclo de muestreo, el tiempo de muestreo y el parámetro a registrar.

El equipo empleado posee un sistema de registro por paquetes versión multi-modo, por lo que se utilizó un canal para el registro del nivel medio por encima del olígrafo y otro para la determinación de las olas.

Para la correcta determinación del valor del nivel por sobre el olígrafo, se utilizó 10 minutos como tiempo de medición, 3000 cantidad de datos a promediar y 12 horas como periodo de repetición del ciclo de muestreo. De esta forma se registra un solo valor por ciclo de medición, el que será utilizado para el cálculo del coeficiente de atenuación  $K(n)$ . Par la determinación de la ola, se utilizó 2 horas como periodo entre mediciones el que tiene como tiempo neto de medición 14 minutos que a la máxima frecuencia de medición de 5 Hz permite obtener un paquete de 4096 datos.

## CONCLUSIONES / RECOMENDACIONES

En los embalses las olas son de periodos relativamente cortos, su generación está normalmente limitada por fetch y su desarrollo y decaimiento ocurre en lapsos relativamente breves. Los instrumentos en el mercado están diseñados primordialmente para olas marinas, lo que hace necesario evaluar con cuidado los rangos de frecuencias, resolución, etc. más adecuados para la aplicación a cuerpos de agua cerrados como lagos y embalses. También es necesario diseñar un esquema de montaje del olígrafo y sistema de registro adecuado a las condiciones del embalse.

Puesto que los resultados se basan en la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier a una serie discreta temporal de presiones, es importante el muestreo en altas frecuencias (5Hz o más) y poseer gran capacidad de memoria dado que se requieren registros cada  $\frac{1}{2}$  ó 1 hora y de 10 a 15 minutos de duración.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

**InterOcean Systems inc.** *S4 User's manual* .

**Goda, Y.** (1990) "Random Waves and Spectra". *Handbook of Coastal and Ocean Engineering. Capitulo IV. Gulf Publishing Company.*

**Goda, Y.** (1977) . "Statistics of Ocean Waves", *Asian Institute of Technology.*

**Brigham, E. O.** ( 1988). "Fast Fourier Transform and Its Applications". *Prentice-hall.*

**Shi-igai, H. y Kono, T.** (1969). "Study on Vibration of Submerged Spheres by Surface Waves". *Vol 12, Coastal Engineering in Japan.*