

Instrumentos virtuales para laboratorios de oleajes utilizados en el diseño de obras costeras y marítimas

Ing. Fernando Berrelleza¹, Dr. Luis P. Sánchez¹

¹ Laboratorio de Modelado y Simulación de Sistemas,
Centro de Investigación en Computación - IPN
Av. Juan de Dios Batís S/N, México, D.F. C.P. 07738.
fberrelleca@sagitario.cic.ipn.mx

² Laboratorio de Modelado y Simulación de Sistemas,
Centro de Investigación en Computación - IPN
Av. Juan de Dios Batís S/N, México, D.F. C.P. 07738.
lsanchez@cic.ipn.mx

Resumen. En este trabajo se presenta el desarrollo de instrumentos virtuales (IV) utilizados en laboratorios de generación de oleaje unidireccional donde se diseñan obras costeras y marítimas tales como: plataformas petroleras, predaplenes, playas artificiales, puentes, obras de protección contra penetraciones de mar y arrastres de arena, entre otras. Es un proyecto en desarrollo y hasta el momento se ha realizado la programación preliminar de IV para adquisición de datos, acondicionamiento digital de la información, visualización gráfica y cálculo de valores estadísticos de oleaje. Se ha usado LabView como lenguaje de programación fundamental.

1 Introducción

Muchas veces la realización de una medida requiere de la intervención de varios instrumentos, unos generan estímulos sobre el dispositivo que se pretende medir, y otros recogen la respuesta a estos estímulos. Este conjunto de instrumentos que hace posible la realización de la medida, recibe el nombre de sistema de instrumentación. La utilización manual de instrumentos para realizar medidas es prácticamente un hecho aislado, sólo en los procesos de investigación y desarrollo de nuevos prototipos o en entornos docentes es una práctica habitual. A nivel industrial las medidas para el control de un determinado proceso, las pruebas funcionales sobre un equipo o el control de la calidad de la producción se realizan de manera automática. Hablar de instrumentos virtuales es hablar de un software que se ejecuta sobre el controlador, que permite independizarnos de los instrumentos reales y de la forma de interconectarlos. El usuario final del sistema de instrumentación solo ve los instrumentos virtuales en el ordenador. La forma habitual para construir un sistema de instrumentación virtual a partir de los instrumentos controlables que tenemos disponibles y de tarjetas de adquisición conectadas directamente al bus del controlador es utilizar un software comercial que facilite esta tarea, en este caso empleamos LabView.

Nuestro sistema de instrumentación está enfocado a los laboratorios de oleaje para el diseño de obras costeras y marítimas, donde el problema en la creación de las mismas, esta dado en la adquisición y procesamiento de datos que resulta difícil y extremadamente limitada. Este sistema de IV's permite la recolección y procesamiento computarizado de la información a través de sensores continuos. Visualización gráfica dinámica y estática.

2 Diagrama de bloques para la adquisición de datos

Podemos adquirir información simultanea de 16 sensores, desde la opción de configuración podemos seleccionar la frecuencia de muestreo, el número de sensores conectados, entre otras funciones. Tenemos tres tipos de dato de entrada: generado, tiempo real y reproducción.

La entrada de datos generados se emplea cuando se requiere tener una respuesta de tipo exponencial o senoidal, la entrada de datos en tiempo real cuando recolectamos la información desde una tarjeta de adquisición y la entrada de reproducción cuando tenemos ficheros de tipo binario y txt.

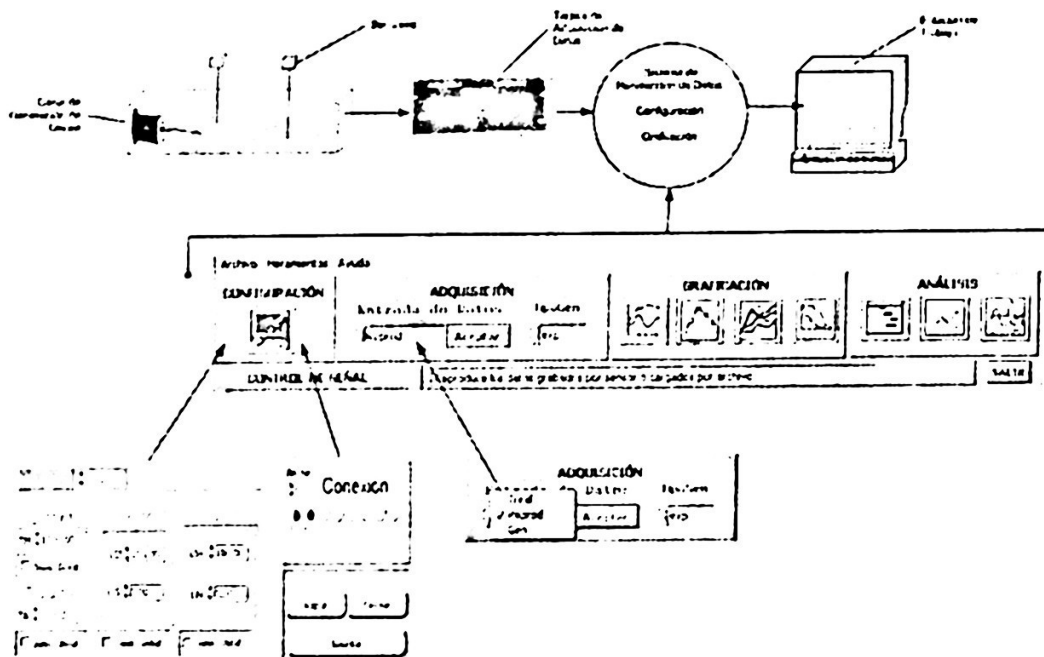


Fig. 1.- Diagrama de adquisición de datos.

3 Acondicionamiento digital de la información

El acondicionamiento digital de las señales es un procesamiento digital primario de las señales muestreadas a fin de dejarlas en condiciones óptimas para su uso por los algoritmos de aplicación tales como: regulación, optimización, análisis estadístico, gráfico, etc.

3.1 Filtrado digital

Con los filtros digitales sólo es posible filtrar ruidos que tengan frecuencias inferiores a la mitad de frecuencia de muestreo. A continuación se plantean las expresiones discretas de tres filtros simples que pueden resultar útiles para la operación en tiempo real y cuando no se requiera una alta selectividad.

Filtro exponencial de primer orden.

$$Y(k) = Y(k-1) + a[X(k) - Y(k-1)] \quad (1)$$

Filtro exponencial de segundo orden.

$$Y(k) = Y(k-1) + A[Y(k-1) - Y(k-2)] + B[X(k) - Y(k-1)] \quad (2)$$

Filtro promedio simple.

$$Y(k) = Y(k-1) + \frac{1}{n}[X(k) - X(k-n)] \quad (3)$$

Donde:

$Y(k)$: salida del filtro en el instante de muestreo k .

$Y(k-1)$: salida del filtro en el instante de muestreo $k-1$.

$X(k)$: entrada al filtro en el instante de muestreo k .

a : parámetro de ajuste del filtro exponencial de primer orden.

$$a = \frac{W_c T (-W_c T + \sqrt{4 + W_c^2 T^2})}{2} \quad (4)$$

Siendo:

W_c : frecuencia de corte de filtro en radianes/segundos.

T : periodo de muestreo de la señal del sensor en segundos.

A, B : parámetros de ajuste del filtro exponencial de segundo orden.

$Y(k-2)$: salida del filtro en el instante de muestreo $k-2$.

n : cantidad de muestras a promediar en el filtro promedio.

$X(k-n)$: entrada al filtro promedio en el instante de muestreo $k-n$.

Como puede apreciarse estos filtros digitales pueden implementarse en sistemas que operan en tiempo real, pues sólo se requiere información en el instante de muestreo actual (k) y en instantes anteriores. Estos filtros deben de ser inicializados así como guardar en la base de datos los parámetros y variables anteriores.

3.2 Conversión de unidades de ingeniería

Esto es un procesamiento matemático que permite obtener, a partir de las lecturas del conversor análogo/digital, sus equivalentes en unidades de ingeniería, es decir, en las

unidades de medición de la variable continua que está siendo medida. De forma matemática se podría plantear que:

$$ValorUI = F(ValorUC)$$

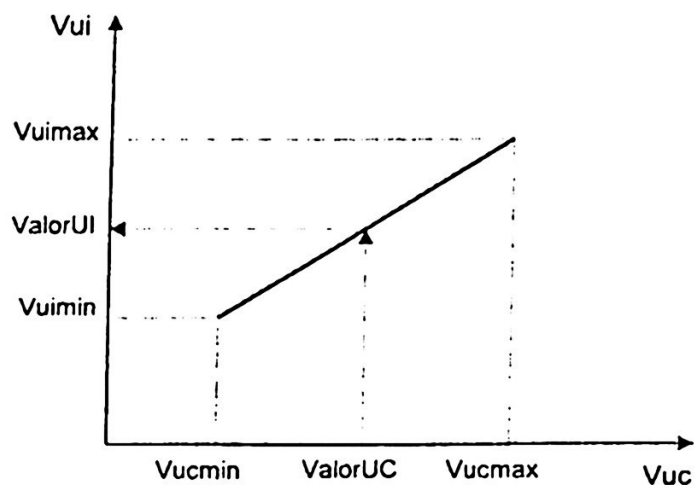
Siendo:

ValorUI : el valor de la variable en unidades de ingeniería. Por ejemplo: presión en Kg/cm², temperatura en °c, nivel en cm.

ValorUC : es el valor leído en unidades del conversor.

F : es una función lineal.

En la gráfica siguiente se ilustra la relación anterior:



$$\frac{Vui\ max - Vui\ min}{Vuc\ max - Vuc\ min} = \frac{ValorUI - Vui\ min}{ValorUC - Vuc\ min} \quad (5)$$

Tomando $Vucmin = 0$ obtenemos:

$$ValorUI = \frac{1}{G} ValorUC + Vui\ min \quad (6)$$

Donde:

$$G = \frac{Vuc\ max - Vuc\ min}{Vui\ max - Vui\ min} \quad (7)$$

3.3 Interpolación

Se realiza el análisis del efecto de la interpolación de puntos en la serie temporal, compatibles con su vector complejo en el dominio de la frecuencia. Con este método

se añaden puntos a un registro de oleaje, obteniéndose un efecto cercano a lo que se produciría de haberlo muestreado a mayor frecuencia. Puede ser seleccionado el número de puntos a añadir, llamándole factor de relleno (Fr), definiéndose de la forma siguiente:

$$Fr = \frac{NPSR}{NPSO} \quad (8)$$

Donde:

$NPSR$: número de puntos de la serie llenada.

$NPSO$: número de puntos de la serie original.

Fr : debe ser potencia de base 2 para que pueda ser aplicado el algoritmo de la *Transformada Rápida de Fourier*.

La figura 2 muestra parte de la gráfica del nivel de agua contra el tiempo para la señal de oleaje. Se presenta la serie original muestreada a 3 Hz y la serie rellena con factor $Fr = 8$.

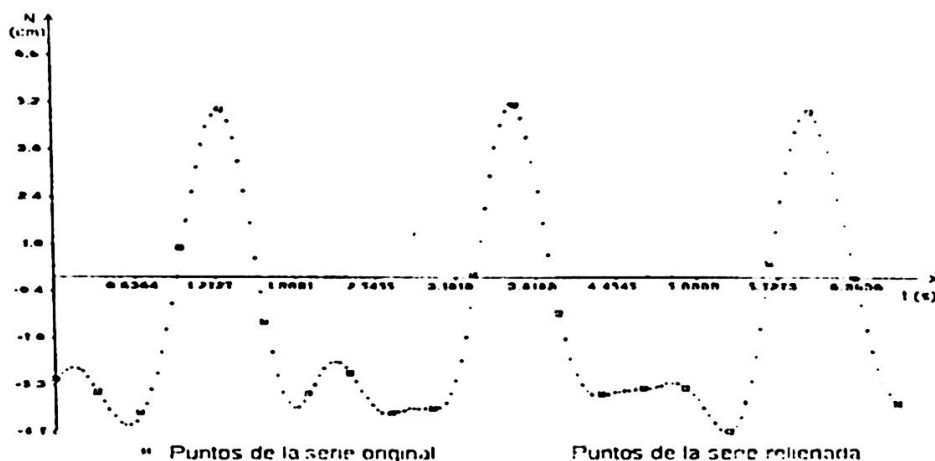


Fig. 2.- Ejemplo de Interpolación Compleja

Con la aplicación del método, se ha reconstruido la serie original, contrarrestando en gran medida la distorsión provocada por una baja frecuencia de muestreo. Se observa que los picos de la señal han sido conformados añadiendo, entre los valores muestreados, puntos los cuales mantienen la compatibilidad con el vector complejo de la serie original (en este caso se añaden 7 puntos entre cada dos muestras). Se nota la conformación de los valores máximos y mínimos, con independencia o no de que exista en dicha posición un punto de la serie original.

En la tabla 1 se presenta un resumen de la media y la varianza de los errores relativos en %, respecto a la señal muestreada a 48 Hz, de las series interpoladas con diferentes factores de relleno (Fr).

Tabla 1. Resumen de la media y la varianza de los errores relativos en %,

	24 Hz	12 Hz	6 Hz	3 Hz
Series Originales	0.48 ± 0.08	1.64 ± 1.52	2.61 ± 3.63	3.1 ± 9.02
Series rellenas 1	(Fr = 2) 0.48 ± 0.08 No hubo mejora	(Fr = 4) 0.37 ± 0.13 Mejoró 4,4 veces	(Fr = 8) 1.16 ± 0.52 Mejoró 2.3 veces	(Fr = 16) 2.28 ± 2.49 Mejoró 1.4 veces
Series rellenas 2	(Fr = 4) 0.04 ± 0.002 Mejoro 11 veces	(Fr = 8) 0.03 ± 0.001 Mejoró 55 veces	(Fr = 16) 0.97 ± 0.76 Mejoró 2.8 veces	(Fr = 32) 1.92 ± 3.09 Mejoró 1.6 veces

Se les llamó series rellanadas 1, a aquellas, en las que se utilizaron factores de relleno (*Fr*), de 2, 4, 8 y 16 para las señales muestreadas con 24, 12, 6 y 3 Hz, respectivamente. Para las 4 señales el número total de puntos de las series interpoladas fue de 4096, esto significa que la serie original muestreada a 24 Hz, tenía 2048 puntos y que la interpolación sólo ha añadido un punto intermedio (entre dos muestras) lo que hace suponer la limitación de poder reconfigurar la serie adecuadamente, para esta señal la interpolación no produjo disminución de los errores. Los errores disminuyeron 4.4, 2.3 y 1.4 veces para las señales muestreadas con 12, 6 y 3 Hz, respectivamente.

Se les denominó series rellenas 2 a las que utilizaron factores (*Fr*) de 4, 8, 16 y 32, para las señales muestreadas con 24, 12, 6 y 3 Hz respectivamente. El número total de puntos de las series interpoladas fue de 8192. Para 24 Hz, la interpolación adicionó 3 puntos intermedios. Se añadieron 7, 15 y 31 puntos intermedios a 12, 6 y 3 Hz, respectivamente. En los dos primeros casos (muestreo a 24 y 12 Hz, respectivamente) se aprecian mejoras considerables, con disminución de los errores en 11 y 55 veces y resultados más modestos para las dos últimas señales, con frecuencia de muestreo muy bajas de 6 y 3 Hz, respectivamente.

Se observa que una vez interpoladas las series muestreadas a 24 Hz y a 12 Hz, en ambos casos la media y la varianza de los errores relativos son similares, quedando demostrado que la interpolación hace innecesario para este ejemplo muestrear la señal continua a 24 Hz, pues resulta suficiente hacerlo a 12 Hz e interpolar con un factor de relleno *Fr* = 8. Se aprecian valores de media y varianza ligeramente menores para 12 Hz, se considera que en tal comportamiento influyen factores aleatorios, que dependen fundamentalmente de la forma en que queden distribuidos los puntos muestreados respecto a la señal continua en el tiempo, la cual al ser irregular hace impredecible tal distribución. En pruebas realizadas que no se muestran en este trabajo, adicionando la misma cantidad de puntos intermedios en ambas series, se mantienen las características de los resultados mostrados.

Resulta evidente que el método de interpolación utilizado siempre disminuye los errores y su efecto es significativamente importante para mejorar la exactitud de las mediciones, cuando éstas han sido realizadas con un muestreo cuya frecuencia ha sido bien elegida. Resultan satisfactorios factores de relleno de 8 y 16, para canales donde se

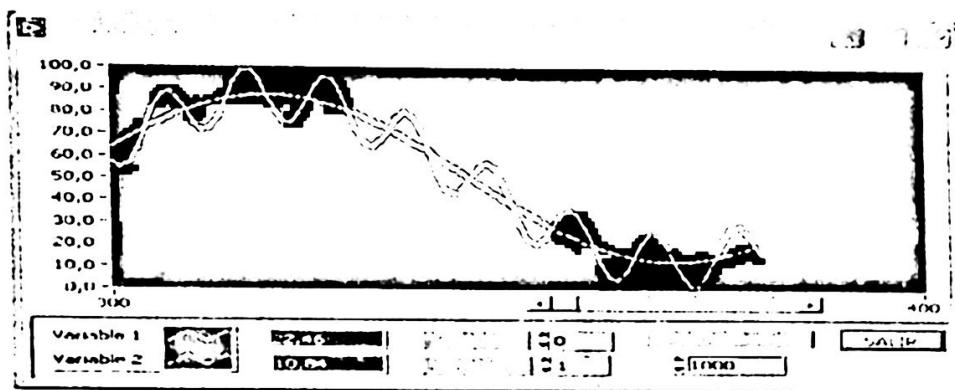
generan oleaje con características similares al analizado y cuyo espectro fue presentado en la ilustración x.

En todas las pruebas realizadas se han mantenido constante el número de olas presentes en el registro de oleaje (35 olas) para que en los errores de los cálculos estadísticos sólo influya la frecuencia de muestreo.

4 Visualización gráfica

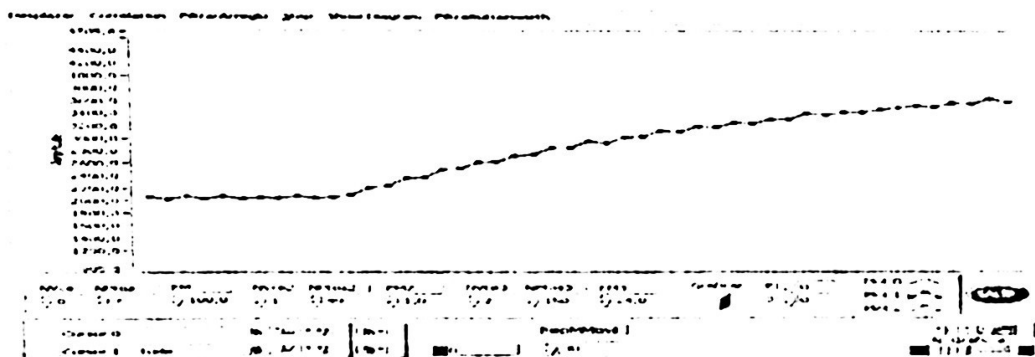
La visualización gráfica nos permite analizar el proceso de recolección de datos en cualquiera de sus entradas, contamos con dos tipos de graficación: dinámica y estática.

4.1 Gráficos dinámicos



La graficación dinámica nos permite visualizar el estado de los sensores ya sea en reproducción, generado o tiempo real, para describir el análisis de datos, permite la selección de dos variables y la actualización de la misma.

4.2 Gráficos estáticos



La graficación estática permite visualizar el efecto de la interpolación donde se realiza el análisis de puntos. Permite la selección del número de puntos y la frecuencia de muestreo de la variable.

5 Análisis estadístico de oleaje

Considérese como punto de partida que se tiene un registro temporal de la superficie del mar en un punto dado. Se tendrá, una muestra del oleaje y se admitirá que este registro representa un estado de mar, donde las variaciones en el tiempo con respecto a su nivel medio vienen dadas por $n(t)$.

5.1 Corrección del nivel medio

Los registros del oleaje contienen la influencia de la variación de la marea u ondas largas y, normalmente, están referidos al fondo, por tanto, es necesario realizar una corrección del nivel medio. Esta corrección bien puede ser la resta aritmética del promedio de la señal o una línea recta o una parábola, siendo estas dos últimas las más convenientes.

En este trabajo se decidió utilizar la corrección parabólica la cual ha demostrado tener mejores resultados para el caso de oleaje.

La corrección de nivel medio del agua haciendo uso de una parábola se deduce también a través del método de mínimos cuadrados, y se puede expresar de la siguiente manera:

$$\bar{\eta} = B_0 + B_1(\Delta t \circ n) + B_2(\Delta t \circ n)^2 \quad (9)$$

5.2 Método de pasos ascendentes por cero

Las ondas individuales pueden ser identificadas usando el criterio de pasos ascendentes por cero o pasos descendentes por cero, entre otros, aunque el primero es el más utilizado en la actualidad. Este método define que una onda tiene su inicio cuando la superficie libre del agua cruza el nivel medio de forma ascendente, y termina en el siguiente cruce ascendente.

El punto exacto donde la superficie libre cruza el nivel medio es localizado por interpolación lineal entre dos puntos más cercanos al cero. Matemáticamente el cruce se define mediante las siguientes ecuaciones:

$$h_i \cdot h_{i+1} > 0 \text{ y } h_{i+1} > 0 \quad (10)$$

Donde h_i es el i -ésimo punto de la elevación de la superficie libre.

Una ola individual es definida usando dos puntos adyacentes por cero. El período de ola de una ola individual, T_i , es la duración entre dichos pasos ascendentes. El valor

más alto de los puntos en una ola individual es encontrado mediante una comparación entre los valores de h_i incluidos.

El valor mínimo de la elevación de una ola individual, h_{min} , puede ser encontrada de forma similar. La correspondiente altura de ola, h_i , de una ola individual, esta dada por:

$$H_i = \eta_{\max} - \eta_{\min} \quad (11)$$

Este procedimiento se realiza con cada una de las olas del registro, obteniéndose una secuencia de parejas de datos de altura y período de ola. Estos datos pueden ser analizados por medio de técnicas estadísticas.

La altura de ola media, $\bar{H}$, y el período de ola medio, $\bar{T}$, pueden ser calculados por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\bar{H} = \frac{1}{N_0} \sum_1^N H_i \quad (12)$$

$$\bar{T} = \frac{1}{N_0} \sum_1^N T_i \quad (13)$$

Donde N_0 , es el número de olas individuales con período de ola y altura de ola identificados por T_i y H_i respectivamente.

La altura de ola cuadrática media, H_{rms} , esta definida por:

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i^2} \quad (14)$$

Para determinar la altura de ola significativa, H_s , y el período de la ola significativa, T_s , se ordenan los datos (H_i ó T_i) de forma descendente. La altura de ola significativa, H_s , se define como la media aritmética del tercio de las olas más altas.

$$H_s = \frac{3}{N_0} \sum_{r=1}^{N_0/3} H_r \quad (15)$$

Donde H_r es la altura de ola del rango r -ésimo (ordenados de mayor a menor). De manera similar el período de ola significativa, T_s , está dado por:

$$T_s = \frac{3}{N_0} \sum_{r=1}^{N_0/3} T_r \quad (16)$$

Adicionalmente el promedio de la altura y el promedio de ola de un décimo de las olas más altas H_{10} y T_{10} , respectivamente, esta dado por:

$$H_s = \frac{10}{N_0} \sum_{r=1}^{N_0/10} H_r \quad \text{y} \quad T = \frac{10}{N_0} \sum_{r=1}^{N_0/10} T_r \quad (17)$$

6 Conclusiones

En las pruebas realizadas se ha mantenido constante el número de olas presentes en el registro de oleaje, para que en los errores de los cálculos estadísticos sólo influya la frecuencia de muestreo. Es evidente que a un mayor número de olas, es decir mayor tiempo de toma de muestras, será superior la probabilidad de reducir el error en los cálculos estadísticos, pues éstos se basan en utilizar las olas mayores, las cuales pueden ser detectadas con mayor probabilidad cuando se toma un elevado número de muestras.

Referencias

1. Sánchez Fernández, L. Pastor., Error de Cuantificación y Frecuencia de Muestreo. Centro de Investigación en Computación – IPN, México
2. Goda, Y.: Random Seas And Design Of Maritime Structures, Segunda Edición. World Scientific Publishing Co. Singapore (2000).