ingeniería hidráulica en méxico, vol. XIX, núm. 4, pp. 121-128, octubre-diciembre de 2004

Dispositivo electrónico, de fácil construcción, para medir la velocidad de un fluido

Rafael Hernández-Walls
J. Ramón Luna-Hernández
Evaristo Rojas-Mayoral

Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, México

Luis F. Navarro-Olache

Intituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California, México

De una manera fácil y utilizando algunos conceptos básicos de física, se muestra cómo construir un correntímetro, el cual puede ser utilizado en laboratorios o en algunos cuerpos de agua naturales, como canales, lagos y esteros. Además, se muestra cómo se puede realizar, por medio de la adaptación del dispositivo computacional conocido como "ratón", la entrada a la computadora de la información sobre la velocidad medida por el dispositivo utilizando un sencillo programa de cómputo. Se muestran las ventajas y desventajas del aparato construido, así como la calibración del dispositivo propuesto.

Palabras clave: medición de corrientes, fuerza de arrastre, dispositivos de entrada.

Introducción

Cualquier sistema de cómputo contiene dispositivos de entrada y salida; entre los más importantes están el monitor, el teclado y el "ratón". Este último puede ser utilizado como un dispositivo para la entrada de información no sólo de la posición del cursor en la pantalla, sino que además puede ser alterado para servir como un instrumento de medición en el laboratorio (Ochoa y Kolp, 1997) o en medios naturales. La alternativa es la construcción de una interfase entre el sensor y la computadora (Ocaya, 2000). Por lo anterior, la contribución del presente artículo es mostrar una forma sencilla de construir un dispositivo que sirva para medir la velocidad de un fluido, utilizando algunos principios básicos de física y un dispositivo de entrada a la computadora como es el "ratón", evitando así tanto el diseño como la construcción de una tarjeta de interfase entre la computadora y el sensor.

La organización del artículo comprende inicialmente un recuento histórico de las técnicas más importantes para el registro de rapidez de un fluido; después se hace el planteamiento del problema físico para así obtener una expresión que es utilizada en las mediciones de la rapidez del flujo mediante un arreglo estructural suspendido por un cable; posteriormente se trata sobre las alteraciones que se deben hacer al dispositivo computacional de entrada, "ratón", para adaptarlo a la anterior estructura; a continuación se describe la función, escrita en lenguaje *C*, que se usa en la captura de la información por medio de un programa de cómputo, y por último, se describe la calibración del aparato.

Antecedentes históricos

Los correntímetros pueden clasificarse bajo diferentes esquemas. Aquí sólo se abordará, generalizando, la clasificación por el tipo de sensor de rapidez. Así, existen

los clasificados como métodos directos y los indirectos (Von Arx, 1974; Neshiva y Fonseca, 1981). Entre estos métodos están los construidos con un rotor Savonius (eje perpendicular al campo de flujo), los que presentan una hélice axial (eje paralelo al campo de flujo), los basados en deformaciones del campo electromagnético, los que funcionan mediante un emisor y receptor acústico, los de "alambre caliente" y, por último, los que están basados en la inclinación de un elemento de arrastre.

Neshiba y Fonseca (1981) mencionan que los correntímetros de rotor Savonius responden a los flujos de cualquier dirección horizontal sin importar la orientación del sensor, por lo que no son recomendables para profundidades cercanas a la superficie donde la acción del oleaje está presente. Por otra parte, los sensores de hélice axial tienden a filtrar los efectos del oleaje (Neshiba y Fonseca, 1981); sin embargo, estos sensores pueden presentar una respuesta a cualquier flujo fuera del eje. Este problema puede ser disminuido al limitar la hélice axial dentro de un cilindro tal que pueda filtrar las señales no deseadas. Los métodos electromagnéticos están basados, principalmente, en la deformación del campo electromagnético por la presencia de una corriente, pero están propensos a procesos de interferencia debido a la influencia de otras fuentes electromagnéticas presentes en el medio. Los métodos basados en el efecto Doppler de una señal acústica (sensor activo) han mostrado ser los más apropiados para realizar perfiles verticales de la corriente y limitados a la existencia de elementos reflectores presentes en el medio (Son Tek, 1997-2000). Por último, los sensores basados en elementos de arrastre han mostrado ser adecuados para usarse en lagunas costeras, esteros, canales y laboratorios (Pritchart y Burt, 1951).

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, existe una variedad de sensores para medir la corriente en cuerpos de agua; sin embargo, el alto costo de equipo comercial puede llegar a ser una limitante para la obtención de información. Buscar métodos de medición autónomos de bajo costo es lo que ha motivado la realización del presente trabajo.

Planteamiento del problema físico

Pritchart y Burt (1951) propusieron un dispositivo para medir la corriente de agua en el que sólo fue necesario medir el ángulo de inclinación originado por el flujo en el dispositivo. Es importante que para una mayor claridad se desarrolle y actualice en esta sección.

Es conocido que la fuerza de arrastre, (F_a), para un fluido estacionario puede ser parametrizada por la siguiente fórmula:

$$F_a = \frac{1}{2} C_d A \rho v^2 \tag{1}$$

donde A es el área máxima del objeto proyectada sobre el plano perpendicular a la dirección principal del flujo y v, su velocidad; ρ, la densidad del fluido, y C_d, el coeficiente de arrastre del objeto inmerso en el mismo fluido. Este último está relacionado estrechamente con el número de Reynolds y debe ser sujeto de un exhaustivo análisis en función de la velocidad del flujo, tamaño y forma el objeto (Voguel, 1994). Sin embargo, en este trabajo no ha sido necesario determinar específicamente un valor de C_d.

La fórmula 1 muestra que todos los objetos experimentan una fuerza de arrastre, la cual es proporcional al cuadrado de la velocidad relativa del objeto en el fluido para un número de Reynolds grande. Por ejemplo, si un pez está nadando en agua en reposo, experimentará una fuerza de arrastre, o de fricción, en sentido contrario a la dirección de su movimiento; otro ejemplo puede ser un edificio que experimenta una fuerza de arrastre por efectos del viento.

En este trabajo se consideró un cuerpo con flotabilidad negativa sumergido como un péndulo en el fluido. Si el fluido está en movimiento y pasa por el cuerpo sumergido, éste deberá experimentar una fuerza de arrastre, tal y como se indica en la ilustración 1. Debido a que el cuerpo está sujeto a un cable y si la velocidad del fluido permanece constante, pronto se alcanza un estado de equilibrio cuando el cuerpo deja de moverse. Así es como se puede visualizar el problema como un diagrama de cuerpo libre y sujeto a las siguientes fuerzas (ilustración 2):

$$\begin{aligned} T \quad \text{sen}(\theta) &= F_a \\ T \quad \cos(\theta) &= W \end{aligned} \tag{2}$$

donde T es la tensión del cable; W, el peso del objeto (dentro del fluido), y θ, el ángulo que hace el cable con la vertical.

Del sistema de ecuaciones (2) puede ser demostrado fácilmente que:

$$\tan(\theta) = \frac{F_a}{W} \tag{3}$$

al sustituir en (3) la fuerza de arrastre (1) y despejar la velocidad:

$$v = \sqrt{\frac{2W \tan(\theta)}{\rho A C_d}} \tag{4}$$

Ilustración 1. Efecto de la fuerza de arrastre en una estructura suspendida como un péndulo.

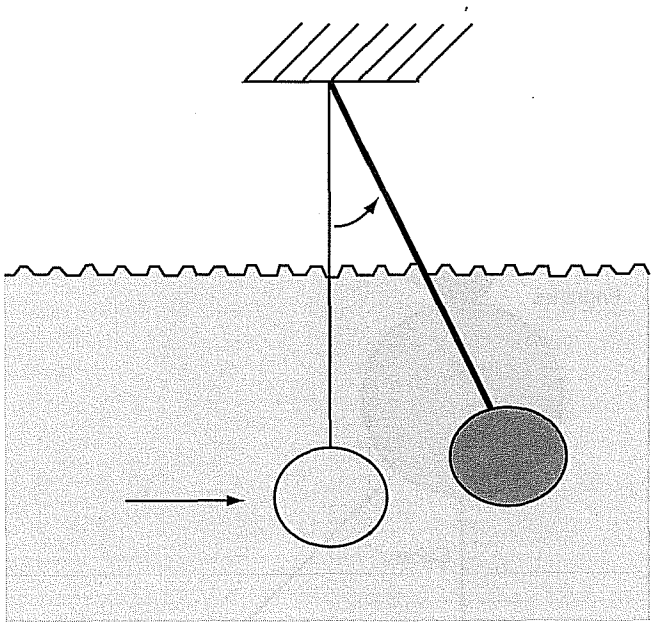
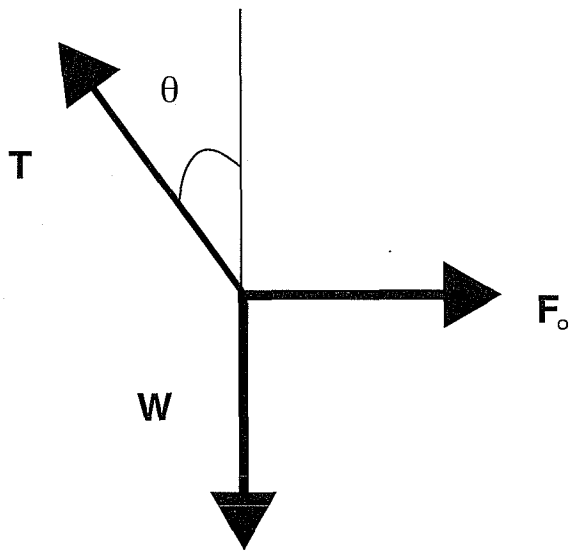


Ilustración 2. Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan en la estructura suspendida.



El término del lado derecho de la igualdad se puede simplificar como:

$$v = K\sqrt{\tan(\theta)} \qquad (5)$$

donde:

$$K = \sqrt{\frac{2W}{\rho A C_d}} \qquad (6)$$

esta constante K, incluye toda la información que se puede obtener o ajustar mediante una calibración con datos conocidos de la velocidad del flujo.

Con base en lo anterior, la velocidad es función únicamente del ángulo que forma el cable con la vertical, lo cual hace que el dispositivo sea fácil de utilizar, porque sólo basta medir el ángulo con un transportador o por medio de un dispositivo electrónico. En este trabajo se optó por lo último. Cabe mencionar que el peso, W, de la ecuación 4 es el sumergido en el fluido (en equilibrio); es decir, ya está incluido el efecto de la fuerza de flotabilidad que el fluido ejerce sobre el cuerpo.

Alteraciones del "ratón"

El dispositivo que se seleccionó para medir el ángulo de arrastre fue el "ratón computacional", lo que facilitó el diseño del aparato. De esta manera, para la construcción del dispositivo se procedió a la remoción de la "bola del ratón" (ilustración 3), lo que da acceso a dos rodillos cilíndricos, los cuales sirven para obtener la posición del dispositivo.

Estos rodillos trabajan ya sea en forma mecánica o en forma óptica. Para la construcción de este dispositivo se escogió uno de los rodillos, al que se le adaptó un cable que puede ser soldado o amarrado firmemente, de tal manera que al moverse el cable se mueva el rodillo (ilustración 4). En el otro extremo del cable se colocó una estructura, cuya forma obstruya, con la mayor área, al flujo. Además, es posible incrementar la sensibilidad del "ratón" por medio de un juego de engranes como los utilizados en el presente trabajo (ilustraciones 3 y 5), los cuales tienen las siguientes dimensiones: diámetros de 20.8 y 5.4 mm. El material de estos engranes es plástico. Con esto, el movimiento del rodillo permite medir el ángulo que forma el cable con la vertical, siempre y cuando se pueda encontrar la función de transferencia del número de pixeles con los grados del ángulo de arrastre. Esto último se trata a continuación.

Código computacional

Aprovechando las interrupciones al Sistema Operativo *MSDOS*, que permiten los programas como el *C* o el *PASCAL* mediante la función *intr*, se puede solicitar información al sistema sobre el dispositivo de entrada utilizado. De esta forma es posible obtener las posiciones

Ilustración 3. Vista interna de un "ratón", donde se pueden ver los rodillos y el juego de engranes.

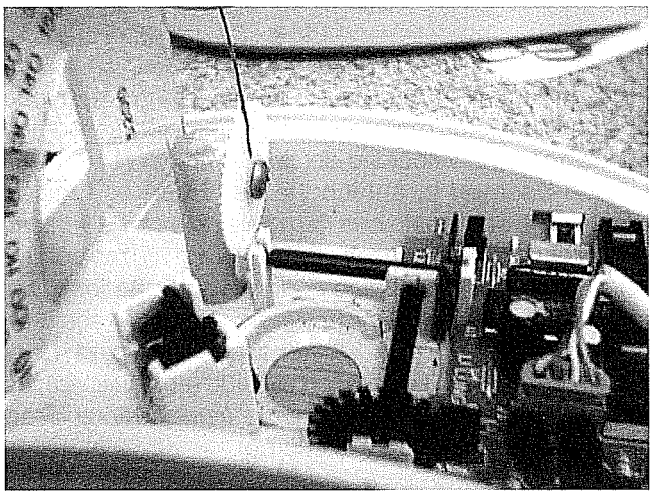
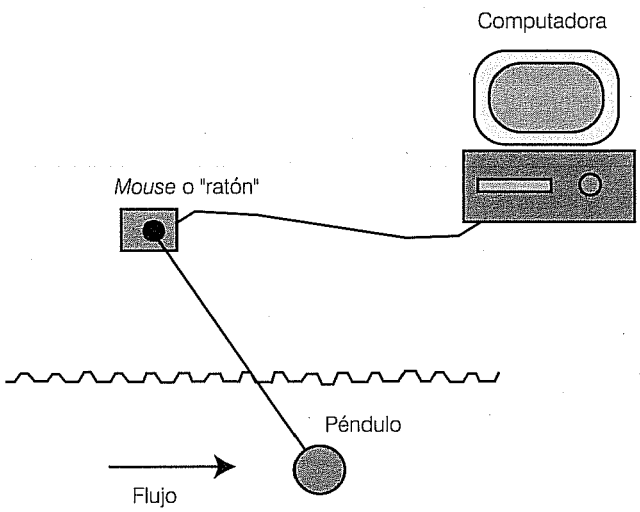
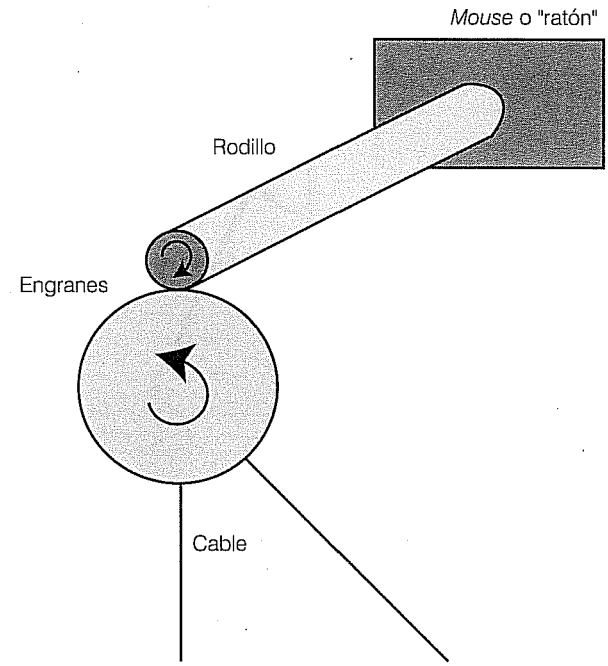


Ilustración 4. Diagrama del dispositivo propuesto para medir la velocidad de un fluido utilizando el "ratón" de una computadora.



del cursor (para nuestro caso será interpretado como una medida del ángulo). Es conocido que para otros sistemas operativos las interrupciones deberán realizarse utilizando las funciones apropiadas para ello; por ejemplo, se recomiendan las funciones API (de las siglas en inglés *Application Programming Interfaz*), cuando se programa para el sistema *Windows 3.2*. En este trabajo se optó por manejar el sistema operativo *MSDOS* y utilizar el modo de graficado, ya que se obtiene mejor resolución que cuando se trabaja en modo de texto; es decir, el tamaño de pixel es más pequeño, lo que permitirá medir mejor

Ilustración 5. Detalle del juego de engranes para aumentar la sensibilidad del "ratón" y medir ángulos más pequeños.



cambios de ángulos pequeños. La función que se presenta en el cuadro 1 muestra la manera de hacer estas interrupciones al sistema operativo; asimismo, la función que se propone en este artículo es:

void mmouse(int funcion, int *x,int *y)

y permite llamar diferentes acciones del "ratón". Por ejemplo, si es necesario comenzar el registro de datos con las coordenadas iniciales del "ratón", esto se realiza mediante el comando:

mmouse(0, &*x*, &*y*)

y para obtener la posición actual del "ratón" se utiliza de la siguiente forma:

mmouse(3, &*x*, &*y*)

Calibración

Para un resultado adecuado de los datos es necesario establecer primero la relación del ángulo medido por el dispositivo y los pixeles que registra el corrimiento del "ratón"; es decir, se debe conocer el ángulo mínimo que puede ser medido con el dispositivo y la relación existente con la cantidad de pixeles. La siguiente es la

Cuadro 1. Rutina escrita en lenguaje *C* (*Borland C*) para obtener información de la actividad del "ratón" mediante la instrucción *intr*.

```
#include <stdio.H>
# include <dos.H>
# include <graphics.h>
# define int_raton 0x33
// manejo del mmouse:
// funcion:
//          0=inicio,
//          1=visible,
//          2=invisible,
//          3=posición
//
void mmouse (int funcion, int *x, omt *y)
          {
          struct REGPACK raton;
          raton.r_ax=funcion;
          intr (int_raton, &raton),
          in (funcion==3)
                    {
                    *x=raton.r_cx;
                    *y=raton.r_dx;
                    }
          }
```

relación propuesta entre el ángulo obtenido y la cantidad de pixeles medidos por la rotación del rodillo del "ratón":

$$\text{Ángulo}=A+B*\text{pixeles}$$

y con ello encontrar la relación ángulo-pixel.

Los resultados para el "ratón" utilizado en este trabajo se muestran en la ilustración 6. Es importante señalar que para la resolución usada se restó el valor de 320 a todos los valores de pixeles correspondiente al valor central de la pantalla. Se encontró que la curva de calibración, con un R^2 igual a 0.9958, satisface la siguiente relación:

$$\text{Ángulo} = -0.51017+0.76192*\text{pixeles}$$

en la que se aprecia que es imposible medir diferencias menores a un grado.

Para encontrar el valor de *K* es necesario medir el ángulo formado por el dispositivo en un flujo de velocidad constante, donde la misma pueda ser cambiada de manera controlada. En esta calibración se hizo variar la velocidad del flujo para minimizar el error. Por simplicidad, estos valores fueron obtenidos midiendo la velocidad del aire (en mph) con un anemómetro de mano (Pat. 295872 CENCO, Sheboygan, Wis). Se utilizó como elemento de arrastre

Ilustración 6. Valor del pixel – 320–*versus* el ángulo medido con un transportador. La línea continua es el ajuste lineal a los datos, dando un R^2=0.9958.

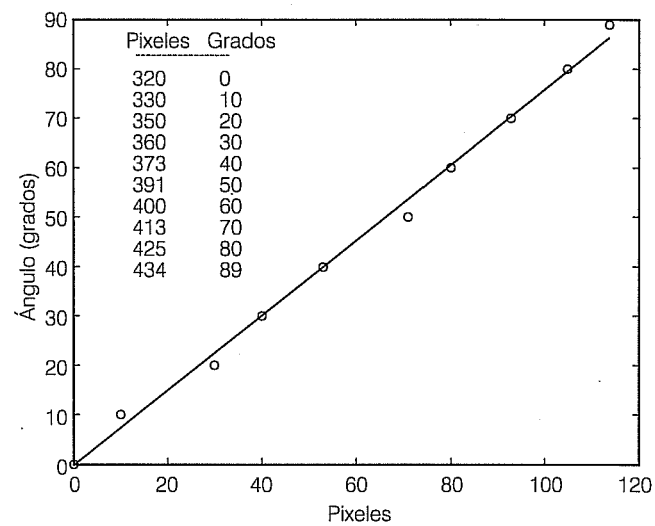
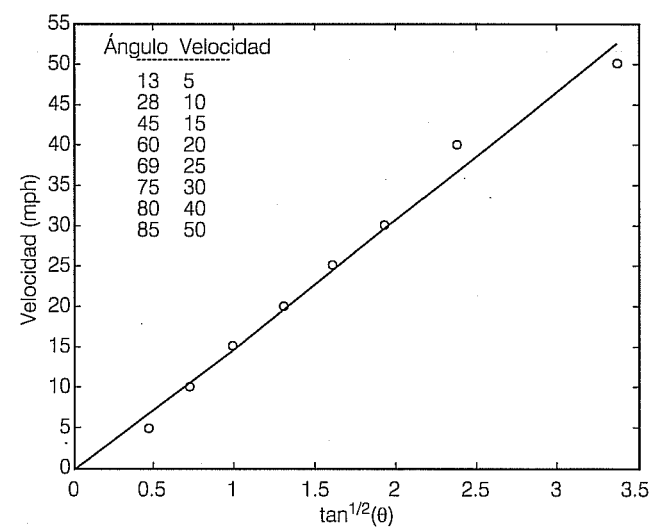
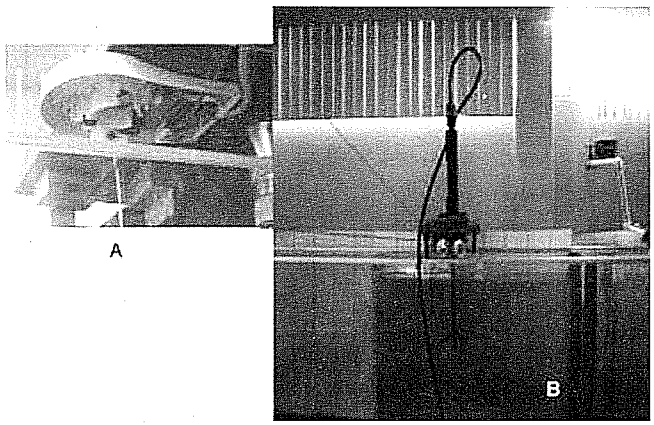


Ilustración 7. Velocidad medida con un anemómetro *versus* $\sqrt{\tan(\theta)}$, donde θ es el ángulo medido con respecto a la vertical. *K* es la pendiente de la recta con un R^2=0.8928.



la misma paleta del anemómetro, que es de plástico y tiene forma de pera, con un ancho mayor y menor de 48.0 y 25.4 mm, respectivamente. Al graficar la velocidad medida contra $\sqrt{\tan(\theta)}$ (ilustración 7), se encontró un comportamiento lineal, así que utilizando la técnica de regresión lineal tenemos que el valor de *K* es cercano a 15.862 mph, con un R^2 igual a 0.8928.

Ilustración 8. Fotografía del dispositivo y el correntímetro acústico (ADV) utilizado para las pruebas en agua.



Calibraciones en agua

Se realizaron una serie de comparaciones de los datos obtenidos por el dispositivo operando en agua contra un velocímetro comercial Doopler marca SonTec Micro ADV 16 MHz para laboratorio (ilustración 8). Este instrumento cuenta con las siguientes especificaciones técnicas:

Parámetro	Micro ADV 16MHz
Razón de muestreo (Hz)	0.1 – 50
Volúmen de muestreo (cc)	0.09
Distancia de muestreo (cm)	5
Resolución (cms^{-1}) -	0.01
Rango de velocidad programable (cms^{-1})	3, 10, 30, 100, 250
Precisión	1% de velocidad medida $\pm 0.25(cms^{-1})$

Los experimentos se realizaron en un tanque de perplex de 120 cm de largo, 30 cm de ancho y 60 cm de altura, el cual se llenó de agua a temperatura constante, mezclada con algunas partículas finas. Los sensores del velocímetro ADV y el sistema de arrastre del dispositivo se colocaron en un nivel similar en la columna de agua, separados entre sí aproximadamente 10 cm. Ambos aparatos se colocaron en la parte superior del tanque, montados sobre un carrito que se operó manualmente en ambos sentidos a lo largo del canal (ilustración 8). Los experimentos consistieron en mover el carrito a diferentes velocidades para generar un flujo que pudiera ser medido y comparado por ambos sensores.

Los resultados obtenidos en los experimentos (ilustración 9), muestran en el eje vertical los valores de velocidad obtenidos por el ADV, mientras que en el eje horizontal se tienen los valores de la raíz cuadrada de la tangente del ángulo de inclinación. La gráfica muestra (línea continua) la correlación (R^2 = 0.58) entre dichas variables, considerando que las mediciones de velocidad se realizan mediante métodos muy diferentes. En el rango de velocidades que se muestreó, no se encuentra una diferencia significativa entre ángulos pequeños (velocidades pequeñas) y ángulos grandes (velocidades grandes) para ambos métodos; sin embargo debemos destacar que el rango de velocidades en el dispositivo llegó a un límite en el que no fue posible medir más debido a la tensión de la veleta que se escogió. Lo anterior se muestra en la ilustración 10, en la cual se observa que aunque el dispositivo reproduce los rangos más sobresalientes de la curva del velocímetro ADV, algunas velocidades exceden del límite debido al rango en el que se operó el dispositivo. Sin embargo, este rango de operación puede modificarse fácilmente, incrementando la tensión sobre el objeto de arrastre, por lo que consideramos tal discrepancia poco trascendente para el propósito de este trabajo.

Ventajas y desventajas del dispositivo propuesto

La construcción de este correntímetro tiene como beneficios la eliminación del error humano en la toma de datos; el almacenamiento automático en archivos de datos listos para

Ilustración 9. Gráfica de los valores de velocidad *versus* $\sqrt{\tan(\theta)}$, donde θ es el ángulo medido con respecto a la vertical; la línea continua es la regresión obtenida en las mediciones con un coeficiente de R^2= 0.58

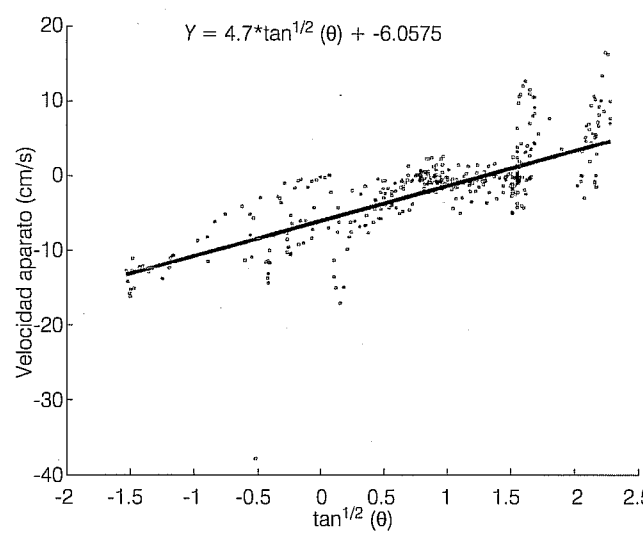
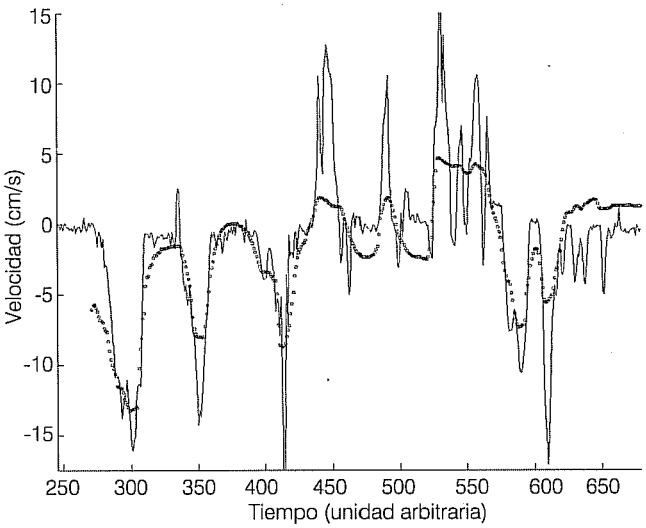


Ilustración 10. Comparación de los valores obtenidos por el dispositivo y el aparato comercial, utilizando los valores de la calibración. La línea continua representa las mediciones realizadas con el correntímetro comercial Doopler marca SonTek Micro ADV, mientras que con símbolo se representan los valores obtenidos con el ajuste del dispositivo propuesto.



ser tratados por la computadora en forma tabular o gráfica; un bajo costo, y fácil construcción de un instrumento de precisión aceptable. Si se considera el costo de un ADV (como el utilizado en este estudio) como un 100%, el costo del aparato propuesto será del orden de 0.02% de dicho valor. Además, es fácil medir diferentes rangos de velocidad con sólo cambiar el peso del objeto, aunque es obvio que esto puede hacer variar el valor de *K*. El aparato propuesto ha mostrado ser confiable, lo que evita la repetitividad de las observaciones en condiciones controladas de laboratorio. Como desventajas se consideran la necesidad de mantener al dispositivo electrónico seco, a fin de garantizar su buen funcionamiento. Para cada "ratón" se debe calibrar el dispositivo, ya que podría cambiar el valor de *K* de un "ratón" a otro. El error en la medición del ángulo, incluso cuando éste puede ser minimizado utilizando un juego de engranes, puede llevar a errores en la medición de la velocidad del flujo y ello puede ocasionar una reducción en la precisión de las mediciones; por otra parte, el "ratón" queda limitado únicamente como instrumento de entrada de información a una computadora, situación que no permite que pueda utilizarse para las otras funciones comunes para las que está diseñado.

Conclusiones

Se ha mostrado cómo puede ser utilizado un dispositivo de entrada, "ratón", de la computadora para construir un correntímetro sencillo y fácil de armar. El correntímetro puede ser utilizado para hacer mediciones dentro de laboratorios o en medios naturales. Es necesario que se tome en cuenta la calibración del aparato para que funcione adecuadamente. El uso de instrumentos mediante dispositivos de entrada estándar a la computadora, sin la necesidad de construir una tarjeta de interfase, abre la posibilidad de explorar otras interfases preconstruidas para otros fines, tal es el caso del puerto de juegos *Joy Stick*. Por otra parte, el calcular la constante *K* en el proceso de la calibración permite evitar el cálculo del coeficiente de arrastre, C_d, que puede ser variable o presentar serias dificultades para su determinación.

Se tienen consideradas nuevas aplicaciones utilizando el dispositivo computacional denominado "ratón", como puede ser la construcción de un mareógrafo o un termógrafo, dispositivos que se explorarán en el futuro.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Universidad Autónoma de Baja California, en particular a la Facultad de Ciencias Marinas, por el apoyo de equipamiento e instalaciones para el desarrollo de estos prototipos, así como también por las facilidades de acceso a la información del proyecto de investigación sobre la "Modelación numérica unidimensional de mareas en el estero de punta banda". También se agradece a Juan José Quijano y Francisca Staines la participación y aportaciones a este proyecto.

Recibido: 27/05/2002
Aprobado: 10/03/2004

Referencias

NESHIBA, S. y FONSECA, T. Corrientes costeras, manual de mediciones y análisis. *Inv. Mar.* Valparaíso. Suplemento al volumen 7, 1981, 132 pp.

OCAYA, R.O. A simple computer interface to time relatively slow physical events. Phys. Educ. Vol. 35, núm. 4, 2000, pp. 267-276.

OCHOA, O.R. y KOLP, N.F. The computer mouse as a data acquisition interfase: application to harmonic oscillators. *Am. J. Phys.* Vol. 65, núm. 11, 1997, pp. 1115-1118.

PRITCHARD, D. y BURT, W.V. *An inexpensive and rapid technique for obtaining current profiles in estuarine waters*. Technical report no. 1. Chesapeake Bay Institute. The Johns Hopkins University, 1951, 16 pp.

VON ARX WILLIAM, S. An introduction to physical oceanography. Massachusetts: Woods Hole Oceanographic Institution (MIT) 1974, pp 180-284.

VOGEL, S. Life in moving fluids. The physical biology of flow. Segunda edición. Princeton: Princeton University Press, 1994, pp. 81-105.

Abstract

HERNÁNDEZ-WALLS, R., LUNA-HERNÁNDEZ, J.R., ROJAS-MAYORAL, E. & NAVARRO-OLACHE, L.F. Easy-to-build electronic fluid flow measurement device. Hydraulic engineering in Mexico *(in Spanish). Vol. XIX, no. 4, October-December, 2004, pp. 121-128.*

Using elementary principles of physics, an easy way of a building a current meter to be used in laboratories or natural water bodies is shown. Also shown is how it is possible to enter the fluid velocity data into the computer through a "mouse" and a simple computer program. Advantages and disadvantages, as well as device calibration, are explained.

Keywords: *flow measurement, tractive force, input devices.*

Dirección institucional de los autores:

Dr. Rafael Hernández-Walls

Facultad de Ciencias Marinas
Universidad Autónoma de Baja California
Kilómetro 103 Carretera Tijuana-Ensenada
rwalls@uabc.mx

M. en C. Ramón Luna Hernández

Facultad de Ciencias Marinas
Universidad Autónoma de Baja California
Kilómetro 103 Carretera Tijuana-Ensenada
jrluna@uabc.mx

P. de Ocean. Evaristo Rojas Mayoral

Facultad de Ciencias Marinas
Universidad Autónoma de Baja California
Kilómetro 103 Carretera Tijuana-Ensenada

M. en C. Luis Felipe Navarro Olache

Instituto de Investigaciones Oceanologicas
Universidad Autónoma de Baja California
Kilómetro 103 Carretera Tijuana-Ensenada
lufena@uabc.mx