

Medidor de niveles rápidamente variable*

Holmes Ripoll Goenaga**

Resumen

Dentro de la operación científica del Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de Las Flores de CORMAGDALENA, el Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambiental –IDEHA– de la Universidad del Norte desarrolló un instrumento electrónico para medir las variaciones rápidas de nivel de agua, denominado NVR99.

El principio de funcionamiento del NVR99 se basa en determinar la resistencia iónica del volumen variable de agua entre un par de electrodos. La resistencia entre los electrodos cambiará inversamente proporcional a la altura del líquido donde éstos se encuentran sumergidos. A través de una conversión lineal de la resistencia entre los dos electrodos se produce una señal eléctrica proporcional a las variaciones del nivel del fluido.

La señal de salida del instrumento es enviada a la computadora central a través de una interfase para ser procesada y almacenada por un módulo software que denominamos NVR99.VI, integrando así un sistema híbrido de alta ejecución y bajo costo, que permite la adquisición de datos, análisis espectral, análisis estadístico en tiempo real, tendencia histórica, calibración y exportación de archivos.

El instrumento ofrece características especiales para ser utilizado en la investigación de modelación física, donde se presentan variaciones rápidas del nivel de agua, como registro de oleaje, flujos transientes, etc. En docencia hidráulica básica, el instrumento puede ser empleado como una herramienta de fácil manejo en propósitos pedagógicos; la teoría básica de ondas puede ser demostrada sin instrumentación complicada.

Palabras clave: Instrumentación virtual, Instrumentos de medida de niveles de flujo.

Abstract

During the scientific operation of the Hydraulic Testing Laboratory of Las Flores (CORMAGDALENA), the Hydraulic and Environmental Studies Institute -IDEHA- of Universidad del Norte developed an electronic device to measure the rapid variations of water level called NVR99. The operating principle of this device consists in determining the ionic resistance of the water variable volume between a pair of electrodes. The resistance between

Fecha de recepción: 20 de enero de 2003

* Este artículo forma parte de los resultados de la investigación *Desarrollo y construcción de un medidor de niveles electrónico rápidamente variable*, financiada por CORMAGDALENA y la Universidad del Norte.

** Coordinador del área de instrumentación electrónica del Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales –IDEHA– de la Universidad del Norte. Profesor catedrático del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la misma universidad. Master en Ciencias Físicas, con énfasis en Instrumentación Electrónica de la Universidad de Antioquia. Licenciado en Educación con especialidad en Matemáticas y Física de la Universidad del Atlántico. hripoll@coomevmail.com

electrodes will change inversely of the high of the liquid in which they are both submerged. By means of the resistance lineal conversion between both electrodes, an electric signal is produced which is proportional to the liquid level variations. The device output signal is sent to the central computer through an interface to be processed and stored by a software module which is called NVR99.VI integrating a high performance and low cost hybrid system that permits data gathering, spectral analysis and statistical analysis in real time, historical trends, calibration and file export.

This instrument offers special features to be used in the physical modeling investigation where rapid variations in the water level are present such as wave registers, transient flows, and so on. In basic hydraulic teaching, the device can be used as an easily operating instrument, for instance, wave basic theory can be demonstrated avoiding complicated instruments.

Key words:Virtual instrumentation, Instruments for measuring flow levels.

INTRODUCCIÓN

Como complemento a la instrumentación electrónica para modelación física, disponible en el Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de Las Flores, en 1991 se inició el diseño y construcción de un medidor de niveles rápidamente variable de tecnología analógica, el cual fue entregado al Ministerio de Transporte en 1993.

Como complemento a las actividades rutinarias de mantenimiento de equipos de campo y la operación y mantenimiento de instrumentos para modelación física, que se realiza en el Laboratorio y debido a daños generales en los medidores de nivel rápidamente variable construidos en 1993, se planteó el diseño y construcción de un instrumento similar. Con el interés de mejorar y optimizar el equipo, se decidió diseñar una versión mejorada en tecnología y con interfase virtual, pero acorde con las restricciones del medio y sin descuidar el rigor y la exigencia al elaborar el diseño.

La construcción del medidor de niveles NVR99 se inició en el taller de electrónica del Laboratorio. Debido a las limitaciones de los equipos de medida, fue necesario el apoyo y recursos de los laboratorios de ingeniería eléctrica, electrónica y mecánica de la Universidad del Norte.

El *software* de análisis NVR99.VI para la captura de la información fue realizado en el Laboratorio en 1998 y mejorado en cuanto a la captura de información para el nuevo medidor. El acople del sistema y los ensayos de calibración y verificación del correcto funcionamiento del equipo se realizaron en el canal de 60lps del Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de Las Flores.

1. FENÓMENO FÍSICO QUE SE VA A MEDIR

El objetivo es diseñar y construir un instrumento electrónico que permita medir

simultáneamente la resistencia iónica y compensar automáticamente las fluctuaciones de conductividad, logrando una conversión lineal de la resistencia eléctrica del fluido en una señal eléctrica proporcional a las variaciones del nivel del fluido. Desde el punto de vista práctico, se utiliza para mediciones de variación rápida del nivel de agua (olas).

1.1. Características del medio

A continuación presentamos el modelo teórico empleado para el análisis de la interacción sensor - medio. El principio físicoquímico del agua, de mayor importancia para la caracterización, es fundamentalmente su comportamiento como electrolito, que involucra, entre otros, los conceptos de:

- Velocidad de migración de los portadores de carga (Movilidad)
- Efectos electrostáticos entre iones (Reciprocidad interiónica)
- Efectos de apantallamiento electrostático en electrodos (Polarización)
- Fuerzas coulombianas (Disociación)

La utilidad del instrumento consiste en que puede ser utilizado para medir la impedancia iónica en presencia de un campo eléctrico externo y variable en el tiempo (ver figura 1).

Figura 1. Impedancia eléctrica del medio

La impedancia eléctrica del medio vista por los electrodos está dada por:

$$\chi(r, w) = \frac{\oint \nabla \phi(r, w) \cdot dr}{\iint \sigma(T) \nabla \phi(r, w) \cdot ds}$$

Donde:

∇	Operador vectorial gradiente
ϕ	Función escalar potencial eléctrico
σ	Conductividad del medio
T	Temperatura del medio
ω	Frecuencia angular
χ	Impedancia eléctrica del medio
dr	Elemento vectorial de línea
ds	Elemento vectorial de superficie

La variación de impedancia del medio indica la variación proporcional del nivel de agua.

2. PRINCIPIOS PARA EL DISEÑO ELECTRÓNICO

Después de realizar un estudio de los requerimientos impuestos por el modelo que se va a operar y de las técnicas de medición existentes se optó por un tipo de sensores resistivos, ya que son de fácil construcción, tienen buenas características dinámicas, son lineales en un amplio rango y su costo es bajo. Por esta razón se utilizó estos sensores, los cuales consisten básicamente en dos electrodos (varillas de acero).

Antes de estudiar la geometría del sensor que desarrollamos es importante una descripción del principio de funcionamiento de este tipo de sensores. Entre las dos varillas existe un volumen variable de agua. Si se aplica a las varillas una diferencia de potencial, se genera un campo eléctrico, el cual establece una corriente neta de iones y, por tanto, existirá en primera aproximación una resistencia eléctrica dada por

$$R = C/h\sigma$$

R = Resistencia eléctrica vista desde los electrodos

h = Altura de la columna de agua

C = Constante que depende de la geometría del sensor

σ = Conductividad del medio

Esto indica que los cambios en la columna de agua son inversamente proporcionales a la resistencia óhmica de los iones, pero se observa además que la conductividad eléctrica varía con la temperatura y de un medio a otro; por lo tanto será necesario medir siempre la conductividad del medio con un electrodo de referencia (en oro) y corregir los cambios termodinámicos e iónicos inevitables, con lo cual se evita una constante recalibración del equipo. Siendo más exigente, se debe utilizar un modelo más real para la interacción medio – sensor, como muestra la figura 2.

Figura 2. Modelo eléctrico del sensor-medio

Así la señal de excitación V_s debe ser alterna para que no se polaricen los sensores. Diferentes autores indican que la frecuencia de la señal alterna debe ser mayor de 1 KHz y menor de 10. Por debajo de 1 KHz cobra importancia el efecto de polarización de los sensores, y a frecuencias mayores de 10 KHz, las corrientes capacitivas introducen errores en las mediciones. Luego de algunas experiencias se escogió una señal de frecuencia 5 KHz para la señal de excitación del sensor.

3. DISEÑO DEL INSTRUMENTO

3.1. Descripción básica

La idea básicamente es implementar un sistema electrónico de medida que permita la modulación y demodulación de la señal de información (variaciones rápidas del nivel de agua). En esta aplicación la señal moduladora varía típicamente entre 0-10Hz y la portadora es del orden de 5KHz, así el detector sigue fácilmente la envolvente. Por otro lado, la habilidad del detector para seguir la envolvente y extraer la señal de información mejora conforme el índice de modulación disminuye, por lo tanto hay un compromiso de diseño entre la eficiencia del sistema, en términos de potencia en la salida del modulador, y de la «calidad» de la señal demodulada.

El NVR99 se diseñó teniendo en cuenta el análisis anterior y las características dinámicas de respuesta en frecuencia del transductor.

3.2. Descripción mecánica

El sensor está constituido por dos varillas de acero inoxidable tipo 316 de $\frac{1}{4}$ de pulgada de diámetro, llamados electrodos de nivel, separados 25 mm y poseen 600 mm de longitud; las varillas se mantienen separadas por medio de una pieza de

plástico en su extremo inferior; en esta pieza y colinealmente con las varillas se encuentra un pequeño electrodo de oro de 5 X 3 mm de diámetro, denominado electrodo de referencia. Los detalles mecánicos de construcción se ilustran en la figura 3.

Figura 3. Diseño del transductor

El diseño del sensor es un compromiso entre su geometría, las propiedades del material utilizado y las precauciones extremas en su construcción.

La linealidad del sensor depende del paralelismo entre las varillas, de la uniformidad del diámetro de las mismas y del alineamiento de los agujeros de las piezas de soporte. Un incremento en la distancia entre varillas mejora la linealidad y aumenta su resistencia eléctrica, pero lamentablemente para obtener la altura de la ola en un punto del modelo físico, la separación entre varillas debe ser tan pequeña como sea posible. Si se disminuye el diámetro de las varillas, aumenta la resistencia eléctrica del sensor y perturba menos a la ola desde el punto de vista hidrodinámico, pero se deteriora su rigidez mecánica.

Para compensar una pequeña alinealidad cuando el agua comienza a cubrir el extremo inferior de las varillas, lo que se conoce como efecto de borde o punta, se dobló en ángulo recto el extremo inferior de una de las varillas que conforman el sensor. Esto permite que el extremo inferior permanezca sumergido aun con escaso nivel de agua, lo cual disminuye el efecto de borde.

Se descarta la utilización de electrodos de bronce, ya que éste es más susceptible a la polarización.

3.3. Descripción electrónica

Para entender el funcionamiento del circuito que comentaremos brevemente en las próximas líneas, remítase a la figura 4, donde se presenta el diagrama electrónico del medidor de niveles rápidamente variable.

Figura 4. Diagrama electrónico del NVR

Se utilizó un oscilador de Wein implementado con el circuito integrado IC2A para generar una señal alterna de 5V (pp) y frecuencia de 5KHz (portadora). El buffer IC2B acopla las impedancias entre el oscilador y la etapa de conversión corriente – tensión, formada por IC2C. El condensador C_3 bloquea el paso de continua hacia los electrodos para evitar su polarización. La corriente a través del electrodo de referencia, que forma parte del circuito corriente–tensión, puede ser ajustada entre ciertos límites por el potenciómetro R_6 .

La tensión que aparece en el pin 8 de IC2C es amplificada en configuración no inversora por IC2D; la ganancia del amplificador se selecciona conmutando R_{10} o R_{11} . La salida del amplificador es llevada a un rectificador de precisión con *buffer* implementado con IC3A, IC4, D_1 , D_2 . Seguidamente la señal es tratada en el circuito detector de envolvente formado por D_3 , D_4 , C_9 y C_{10} . Es necesario un acople entre el detector y el filtro de paso bajo, construido con IC3C en configuración *vsvc*.

Finalmente la señal es conducida por IC3D a IC1 en una configuración de lazo de corriente 4-20 mA.

4. DISEÑO DEL SOFTWARE-HARDWARE

4.1. Software de aplicación

Para la elaboración del programa se contó con el *software* de aplicación LabView,

disponible en el Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de Las Flores - CORMAGDALENA. LabView es una herramienta que está basada en un lenguaje de programación gráfico y orientado a objetos. Los programas desarrollados son llamados instrumentos virtuales (VIs) y tienen tres características importantes:

- La interfase que interactúa con el usuario del (VI) es llamada panel frontal, ya que éste simula el panel de un instrumento físico. El panel frontal puede contener perillas, pulsadores, gráficos y otros tipos de controles y visualizadores.
- Los instrumentos virtuales (Vis) reciben instrucciones desde un diagrama de bloques, el cual se construye en lenguaje G. El diagrama de bloques es una solución gráfica programada de un problema.
- Los (Vis) pueden ser jerarquizados, es decir, pueden ser usados como subprogramas. Un (VI) dentro de otro (VI) se llama un (subVI). El icono / conector de un VI trabaja como una lista de parámetros gráficos para que otro (VI) pueda pasar datos a éste como un (subVI). En la figura 5 se observa el panel frontal del instrumento virtual NVR99.

Figura 5. Panel frontal del instrumento virtual NVR99

El programa desarrollado realiza las funciones de adquisición de señales, visualización de datos, escritura de archivo y procesamiento estadístico de datos.

4.2. Hardware de aplicación

Se contó con una tarjeta de adquisición de señales de National Instruments ATMIO-16X y de módulos de acondicionamiento de señal de la serie 5B de la misma casa matriz.

Este *hardware* ya existía en el Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de Las Flores y forma parte del SAPD (4), Sistema de Adquisición y Procesamiento de Datos del área de instrumentación electrónica de dicho Laboratorio.

5. CALIBRACIÓN PARA OPERACIÓN

El NVR99 puede ser montado en un conjunto soporte con limnómetro, de donde puede ser manejado con facilidad. Las varillas (electrodo medida) están marcadas cada 5 cm para facilitar las mediciones.

Los potenciómetros R6, R10 y R11 localizados dentro de la Unidad de Acondicionamiento pueden ser ajustados manualmente, de tal manera que se obtengan los voltajes respectivos para una altura determinada, además su óptima calibración mejora la sensibilidad del instrumento. Por ejemplo, en el rango de 0.5 – 40 cm, con una sensibilidad de 0.12 v/cm a una altura de 40 cm, los potenciómetros deben ser ajustados para obtener una señal de 5 voltios, y para una altura de 0.5 cm se debe obtener una señal de 0.05 voltios, de esta manera se obtiene una calibración correcta del instrumento de medición.

Una ecuación aproximada de la altura en función del voltaje de salida puede ser calculada usando un programa de cómputo de mínimos cuadrados o ajustes de polinomio. En las figuras 6 y 7 se muestran ejemplo de hojas de calibración y sus respectivas curvas residuales, para efectos de análisis de los porcentajes de error.

Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de Las Flores

Area de Instrumentación Calibración del NVR 25 de julio de 2000

Serial 001 Rango 0,5-40 cm

Temperatura 27°C Ganancia 0.12 v/cm

La fórmula de calibración es:

$$H = 0.03 + 8.71V - 0.30V^2 + 0.03V^3 \text{ cm/v}$$

Figura 6. Curva de calibración del NVR 99

Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de Las Flores

Area de Instrumentación Calibración del NVR 25 de julio de 2000

Serial 001

Rango 0,5-40 cm

Temperatura 27°C

Ganancia 0.12 v/cm

Figura 7. Curva residuales

6. CONEXIONES

El instrumento puede ser conectado a un sistema de adquisición y procesamiento de datos SAPD o directamente a un medidor de tensión o corriente, teniendo en cuenta, para esta última, colocar una resistencia de 250 ohmios de carga. En la figura 8 se muestra un diagrama de conexión típico de aplicación del instrumento.

Figura 8. Diagrama del NVR conectado al SAPD

7. ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO

- Rango de medida del nivel	0.5 – 40 cm
- Respuesta dinámica	0 – 10 Hz
- Sensibilidad	0.06 - 0.12 V/cm
- Electrodo de medida	Tubo de acero inoxidable de 60 cm de largo y $\frac{1}{4}$ de diámetro
- Electrodo de Referencia	Cilindro en oro de 1 cm x 0.5 cm de diámetro
- Conductividad del Fluido	0.1 – 1 mS/cm
- Suministro de potencia	120 VAC – 50 Hz (variación $\pm 5\%$)
- Longitud del cable	100 m estándar entre el sensor y el sistema de medida
- Unidad de Acondicionamiento	Caja en aluminio 10.5 x 7.5 x 3.5 cm
- Salida de la señal	4 – 20 mA

CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado los resultados de la investigación realizada por el área de instrumentación electrónica del Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales –IDEHA– de la Universidad del Norte, con el apoyo del Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de Las Flores de CORMAGDALENA.

Existen instrumentos de medición similares al NVR99, desarrollados por laboratorios de investigación extranjeros como:

- Delft hydraulics
- HR Wallingford
- Laboratoire central d'Hydraulique de France

Estos centros de investigación suministran excelente instrumentación para modelación física, pero los costos de compra o alquiler de equipo son altos.

El NVR99 es un instrumento versátil, robusto, de fácil manejo y calibración, puede ser conectado directamente al medidor de tensión o corriente, o a un sistema de adquisición y procesamiento de datos.

El NVR99 ofrece en su diseño y construcción una mezcla de las mejores características encontradas en los distintos modelos de medidores de nivel rápidamente variable, fabricados por distintos laboratorios de investigación hidráulica.

Con este trabajo y el publicado en 1998 (ver bibliografía) se demuestra que se puede dotar de instrumentación científica, de buena calidad y bajo costo, a laboratorios de investigación y universidades que operen con modelos físicos o sistemas similares.

Bibliografía

- [1] GUARAGLIA, D. Desarrollo de un sistema de medición de olas en modelos hidráulicos. *Memoria del XII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Vol. 1, p. 281-292. Sao Paulo – Brasil, 1986.
- [2] PÉREZ, E. Medidor electrónico de niveles rápidamente variable. *Revistas Ríos y Costas – MOPT– Uninorte*, 1994.
- [3] PALLÁS ARENY, R. *Sensors and Signal Conditioning*. John Wiley & Sons, 1991.
- [4] RIPOLL, H. Sistema de Adquisición de Datos, aplicando instrumentación virtual. *XIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*, Vol. 2, p. 815 – 828. Cali (Colombia), 1998.
- [5] PALLÁS ARENY, R. *Adquisición y Distribución de Señales*. Barcelona, Marcombo, 1993.
- [6] BROWN, B. *IC Data Book Linear Products*, 1999.
- [7] RIPOLL, H. Manual para la operación del medidor de niveles rápidamente variable. CORMAGDALENA, Universidad del Norte. Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales-IDEHA. E-086-022, Barranquilla, agosto del 2000.
- [8] SIGNETICS Notas de Aplicación NE5521.
- [9] Catálogos de equipos
 - Delft hydraulics
 - HR Wallingford
 - Laboratoire central d'Hydraulique de France