

## Caracterización dinámica de sensores de presión utilizando el principio de la botella de mariotte

### Dynamic characterization of pressure sensors using the principle of mariotte's bottle

Mauricio González Betancourt<sup>1\*</sup>, Juan S. Giraldo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Carrera 80 No 65-223 - Núcleo Robledo. Medellín, Colombia.

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle Sede Meléndez. Calle 13 No 100-00. Cali, Colombia.

(Recibido el 24 de noviembre de 2012. Aceptado el 23 de enero de 2014)

#### Resumen

Se presenta una metodología para evaluar las características dinámicas de los sensores de presión implementados en canales o modelos hidráulicos, la cual se basa en el análisis de las señales de entrada rampa y escalón en el dominio del tiempo, que permiten definir el rango útil en frecuencia y en amplitud de los sensores. Las señales son obtenidas a partir de la apertura y el cierre de válvulas presentes en un generador de presión aperiódico, diseñado bajo el principio de la botella de Mariotte.

-----*Palabras clave:* Calibración dinámica, calibración de sensores, presión, flujo en canales, modelos hidráulicos

#### Abstract

A methodology to evaluate the dynamic characteristics of pressure sensors used in channels or hydraulic models is presented. This is based on the analysis of the ramp and step signals in the time domain for defining the useful range in amplitude and frequency of the sensors. The signals are obtained from the opening and closing of valves present in an aperiodic pressure generator designed with the principle of the Mariotte's bottle.

-----*Keywords:* Dynamic metrology, sensor calibration, pressure, channels flow, hydraulic models

---

\* Autor de correspondencia: telefax: + 57 + 4 + 4255105, correo electrónico: mgonzalezbet@unal.edu.co (M. González).

## Introducción

El control, el monitoreo y las variaciones rápidas de las magnitudes físicas, son importantes en el momento de caracterizar la respuesta dinámica de un sensor o un sistema (tomas y sensores de presión, amplificadores, conversores, etc.) y fundamental para la verificación de su aptitud en la medición, es decir si su rango útil tanto en frecuencia como en amplitud cubren las frecuencias dominantes y amplitudes del fenómeno a estudiar; además de permitir encontrar la incertidumbre dinámica [1].

Para modelos hidráulicos que requieren de la medición de la presión dinámica, se utilizan sensores de presión piezoresistivos y bandas extensométricas (Strain gage), ya que trabajan con una frecuencia natural alta e inician su comportamiento lineal desde una frecuencia de 0 Hz [2].

Ahora bien, la calibración dinámica de sensores cobra importancia en la verificación de parámetros tales como la sensibilidad ( $S_d$ ), la frecuencia natural ( $w_n$ ) y el amortiguamiento ( $\xi$ ), debido a que:

1)  $S_d$ ,  $w_n$ , y  $\xi$  generalmente son aportados por el fabricante para el aire y no para otros fluidos [2], pues en el mercado existe mayor demanda por sensores de presión para máquinas de combustión interna, turbinas de gas, la aeronáutica, fenómenos acústicos, dispositivos biomédicos, entre otros [3, 4].

2) Los sensores son configurados muchas veces a través de tomas de presión (tubo o manguera) u otros elementos, formando un sistema [2, 5-7].

3) La parte sensitiva y más vulnerable de los sensores piezoresistivos y de las bandas extensométricas es una membrana, en algunos casos protegida por un aislante ambiental. El desgaste físico de estos elementos imperceptible a simple vista y debidos al flujo, al ambiente o por el manejo de los operadores, generan variaciones en los parámetros  $S_d$ ,  $w_n$ , y  $\xi$ .

Para evaluar los parámetros  $S_d$ ,  $w_n$ ,  $\xi$  y otras características dinámicas de los sistemas de medición de presión en modelos hidráulicos,

en este artículo se describe una metodología basada en el análisis de las señales en el dominio del tiempo, rampa y escalón, inducidas por un generador de presión basado en el principio de la botella de Mariotte. Esta metodología fue aplicada experimentalmente a un sistema de medición de presión instalado en el fondo de un canal y como resultado, se obtuvieron sus correspondientes características dinámicas.

## Calibración dinámica

La finalidad de la calibración dinámica es la determinación de la función de transferencia del sistema (proporción entre las transformadas de Fourier de la señal de salida y entrada [8]), lo que permite determinar el rango útil en frecuencia del sensor y sus demás características dinámicas. Lo anterior difiere de una calibración estática (calibración de pesos muertos), en donde el transductor es caracterizado solo por su sensibilidad.

Los métodos para la calibración dinámica de los sensores de presión, pueden ser clasificados en dos grandes categorías de acuerdo a las señales de prueba empleadas para este propósito:

1) El método de frecuencia, usando las señales armónicas definidas [9], el cual permite obtener las características dinámicas observando el comportamiento de la sensibilidad alrededor de la frecuencia (figura 1), por ejemplo el rango lineal se define hasta identificar un cambio de más o menos 3 dB (rango útil del sensor) y la frecuencia de resonancia, en el punto donde se produce la máxima amplitud.

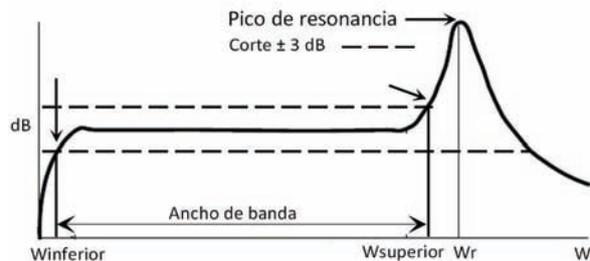


Figura 1 Respuesta en frecuencia de un sensor

2) El método temporal, en el cual al introducir una señal de prueba, es posible modelar matemáticamente la respuesta del sensor y predecir su desempeño ante otras entradas más complejas [3, 5, 9]. Una señal de entrada típica es la función escalón, de la cual se estudia la respuesta transitoria y estable del sensor y se determinan los tiempos de levantamiento, de pico y el sobrepasso máximo, entre otros parámetros, que tienen relación con la frecuencia natural y el amortiguamiento del sistema de medición, básicos para determinar la función de transferencia.

Los sensores para la medición de presión se estudian bajo los siguientes supuestos [3, 10, 11]: 1) El sistema es operado en una región lineal o está linealizado con respecto al punto de operación nominal. 2) El sistema aproxima su comportamiento a un sistema de segundo orden. 3) Se tiene un solo grado de libertad. Estos supuestos suelen ser válidos si la primera resonancia es dominante, es decir si al observar la respuesta transitoria se puede identificar si existe una respuesta oscilatoria acompañada de un sobrepasso del valor estable.

La función de transferencia para un sistema de segundo orden (ecuación (1)) utilizando la transformada de Laplace, es función de la variable compleja  $s$  y de las constantes reales  $w_n$  y  $\xi$ .  $Y(s)$  y  $R(s)$  son las transformadas de Laplace de la función de salida y de entrada respectivamente. Si la función de entrada esta en unidades de presión debe ser multiplicada por  $S_d$  [3].

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2} \quad (1)$$

La función de transferencia para una entrada tipo escalón unitario,  $R(s)=1/s$ , se convierte en la ecuación (2) Aplicando la transformada inversa de Laplace a la ecuación 2 se obtiene la ecuación (3) para un sistema subamortiguado ( $1 > \xi$ ), con un tiempo ( $t$ ) mayor o igual a cero.

$$Y(s) = \frac{w_n^2}{s(s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2)} \quad (2)$$

$$Y(t) = 1 - \frac{e^{(-t\xi w_n)} \text{sen} \left( w_n \sqrt{1-\xi^2} t + \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi} \right)}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (3)$$

Los parámetros  $w_n$  y  $\xi$  se pueden definir a partir de la información de la señal de salida del sensor, desde el inicio del ascenso hasta el sobrepasso máximo, para lo cual se deriva la ecuación 3 con respecto al tiempo y con algunas simplificaciones [10] se obtiene el tiempo pico ecuación (4).

$$t_{pico} = \frac{\pi}{w_n \sqrt{1-\xi^2}} \quad (4)$$

Al sustituir la ecuación 4 en la ecuación 3 se obtiene la magnitud del sobrepasso máximo ( $M$ ) en función del factor de amortiguamiento relativo [10], ecuación (5).

$$M = Y_{pico} - 1 = e^{-\left(\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right)} \quad (5)$$

La frecuencia de resonancia ( $w_r$ ) está relacionada con la frecuencia natural según la ecuación 6 para un  $\xi$  entre 0 y 0.707.

$$w_r = w_n \sqrt{1 - 2\xi^2} \quad (6)$$

El ancho de banda  $BW$  determina la capacidad de reproducir la señal de entrada y las características de filtrado necesarias para el ruido de alta frecuencia. En términos generales, puede decirse que el ancho de banda es proporcional a la velocidad de respuesta del sistema (ecuación (7)).

$$BW = w_n \left[ (1 - 2\xi^2) + \sqrt{\xi^4 - 4\xi^2 + 2} \right]^{1/2} \quad (7)$$

Establecido el rango de trabajo del sensor y con la función rampa como entrada, se estudia cómo responde el sistema con linealidad [12], es decir qué tanto la señal de salida de un transductor sigue la ecuación (8).

$$V_{out} = V_{off} + S_d H \quad (8)$$

En donde,  $V_{out}$  es la señal de salida del sistema ante la presión  $H$  y  $V_{off}$  es la compensación basada en el muestreo hasta la presión de referencia.

Mientras que la región lineal (en donde  $S_d$  permanece estable), inicie ( $w_{inferior}$ ) en la frecuencia de 0 Hz (estático) y el comportamiento del transductor sea representado por la ecuación 1, la sensibilidad puede ser establecida por una calibración estática [2, 3]. Generalmente los sensores de presión piezoresistivos y bandas extensométricas permiten este procedimiento a diferencia de otro tipo sensores como los piezoeléctricos, en los cuales la respuesta en frecuencia no empieza en 0 Hz [2]. Un análisis de la señal de entrada escalón en el dominio de la frecuencia (diagrama de Bode), ayudará a la identificación del inicio de la región lineal.

La incertidumbre dinámica total ( $\delta_T$ ) es importante como característica del sistema de medición de presión, pues indica la precisión de la medida de la amplitud dinámica y se determina, combinando las componentes de incertidumbre del sistema según la ecuación 9, como se recomienda en la referencia [13]

$$\delta_T = f \sqrt{\delta S_d^2 + \delta S_M^2 + \delta I_{nt}^2} \quad (9)$$

En donde,  $\delta S_d$  es la incertidumbre de la sensibilidad,  $\delta S_M$  el error por el sobrepaso y  $\delta I_{nt}$  representa los diferentes errores identificados en el sistema. Cada una de estas componentes pueden ser determinadas por métodos estadísticos u otros según lo indica la referencia [13]. Por su parte  $f$  es el factor de cobertura para expandir la incertidumbre, el cual normalmente se encuentra entre 2 y 3, sin embargo su cálculo es discutido en las referencias [13-15].

De esta manera por medio de  $\delta_T$  es posible admitir la medida de amplitud o en caso contrario descartarla, siendo necesaria la implementación de un filtro digital que ajuste la respuesta del sensor a su ancho de banda y disminuya el sobrepaso. Si luego de este procedimiento no se obtienen resultados admisibles, es necesario buscar otro sensor de mayor amortiguamiento

para obtener un menor error por sobrepaso, ya que estos dos parámetros tienen relación inversa.

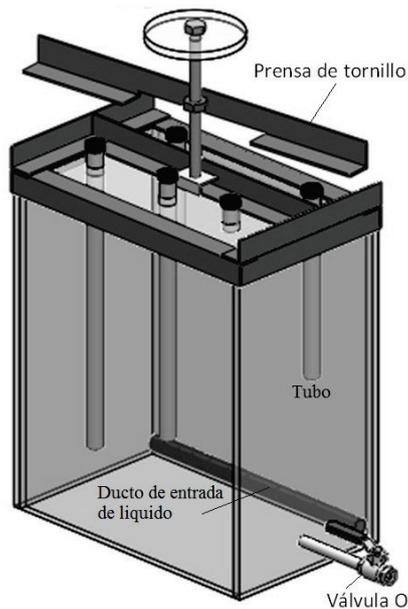
### Generador de presión aperiódico bajo el principio de la botella de Mariotte

Los generadores de presión dependiendo de la señal de entrada, son de forma aperiódica o periódica [8, 16]. Los primeros trabajan con señales de entrada con una forma establecida, generalmente tipo impulso, escalón o rampa. Entre sus principios de funcionamiento se destacan los calibradores de válvula de apertura rápida [17, 4], tubo de choque [18, 19], pistón hidráulico y cilindros de impulso [16]. Por su parte, los segundos o periódicos, trabajan con señales armónicas sinusoidales definidas como los pistofonós de acústica [16], la válvula rotativa [20, 21], el generador piezoeléctrico [22] y los generadores de columnas líquidas [23], entre otros.

El calibrador dinámico ideal debería ser una estructura para generar con exactitud una presión de referencia conocida, que pueda ser continuamente ajustada sobre un extenso rango de amplitudes y frecuencias. Sin embargo en la práctica los generadores se plantean para soluciones específicas [16].

En este estudio se diseña un generador de presión aperiódico, para la calibración de sistemas que miden la presión en el fondo de un canal, en donde las fluctuaciones de presión poseen frecuencias dominantes menores a 4 Hz [24] y no superan los 25 Hz [25]. Adicionalmente, para cubrir varios tipos de flujo incluyendo el resalto hidráulico, el generador en cuestión permite introducir una señal rampa y una señal escalón, estando en capacidad de medir y generar cambios de presión graduales o bruscos. La señal rampa se caracteriza por ser de baja frecuencia, en donde la presión cambia linealmente en el tiempo, mientras que la señal escalón contiene un espectro de frecuencia de banda ancha, con un cambio súbito de la presión [10].

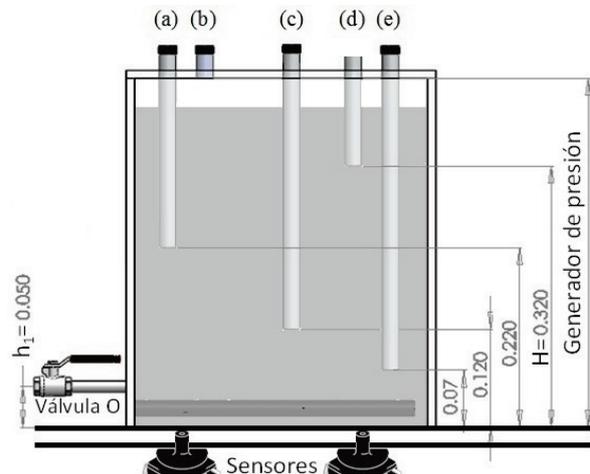
El generador de presión consiste en una caja en acrílico con graduación de nivel, con dimensiones de 40x35x45 cm<sup>3</sup> (Figura 2), que al asentarse con empaques a la zona de prueba (piso del canal), se asemeja a una botella de Mariotte [26], la cual tiene la particularidad de que solo tiene contacto controlado con la atmósfera a través de varios tubos. Cada tubo atraviesa la cara superior de la caja, de tal forma que uno de sus extremos está en el interior del dispositivo a una altura específica desde el fondo, mientras que el otro permanece en el exterior con una válvula de apertura rápida (tapón o un diafragma tipo tubo de choque). La apertura de la válvula permite la entrada y salida de aire y sobretodo la comunicación con la atmósfera. Por otra parte, el generador en su parte inferior posee un ducto perforado que permite la entrada de agua evitando fluctuaciones bruscas de nivel y turbulencia. En la parte superior del ducto de entrada, se localiza la válvula para su salida (O), figura 2.



**Figura 2** Generador de presión basado en el principio de la botella de Mariotte

La entrada de la señal rampa se establece con: 1) La apertura de la válvula del tubo más distante del fondo (figura 3, válvula b). 2) La acumulación de agua en el generador a una velocidad constante.

3) El registro de la señal de salida y entrada,  $V_{out}$  y H (presión en cm de columna de agua), respectivamente.



**Figura 3** Vista lateral del generador de presión en la instalación experimental

Para generar la señal escalón, se acondiciona el generador llenando la caja con agua y cerrando posteriormente todas las válvulas superiores, para luego permitir la salida de agua por la llave inferior (Figura 3, O). Esta operación induce inicialmente a la salida del líquido y a la expansión del gas en el interior de la botella, hasta alcanzar un equilibrio hidráulico entre las presiones del espacio exterior que rodea la botella (presión atmosférica) y las internas del sistema, en el punto inferior de la llave abierta (O). En este instante, la presión manométrica sobre el sensor es igual a la columna de agua hasta la llave O, expresada en la figura 3 por  $h_1$  (a pesar de una mayor columna de agua).

Posteriormente, el escalón de presión sobre el sensor se introduce al variar el punto de aplicación de la presión atmosférica en la columna de agua sobre éste, mediante la apertura rápida de una válvula de un tubo con su extremo sumergido en el líquido (válvula d, figura 3). Al igual que la botella de Mariotte, dada la apertura de la válvula de uno de los tubos, la presión en columna de agua sobre el sensor será la distancia vertical desde el extremo sumergido del tubo hasta el sensor (ecuación (10); [26]). Al considerarse en el

dispositivo tubos de diferente distancia respecto al fondo, es posible generar diferentes escalones de presión.

$$P_s = P_{atm} + \gamma gH \quad (10)$$

Del generador desarrollado se destacan los siguientes aspectos: (a) El correcto funcionamiento del dispositivo depende del sello hermético de todas las perforaciones y válvulas [27]. (b) Antes de cualquier escalón, se debe preparar el generador llevando la presión inicial  $h_1$  con el equilibrio hidráulico en la válvula O. (c) Mientras un tubo este abierto y sumergido, la presión en el plano horizontal que contiene el extremo inferior del tubo permanecerá constante e igual a la presión atmosférica, así la carga hidráulica sobre el orificio de la válvula O permanecerá constante y d) la velocidad de salida del agua en la válvula O, está dada por el principio de Torricelli (ecuación (11)). e) Con la salida de agua y la expansión del gas en el dispositivo, se genera una succión momentánea de aire que entra a través del tubo sumergido en contacto con la atmosfera (se generan burbujas). (e) Si se tapa el tubo, de nuevo el sistema busca el equilibrio hidráulico en O.

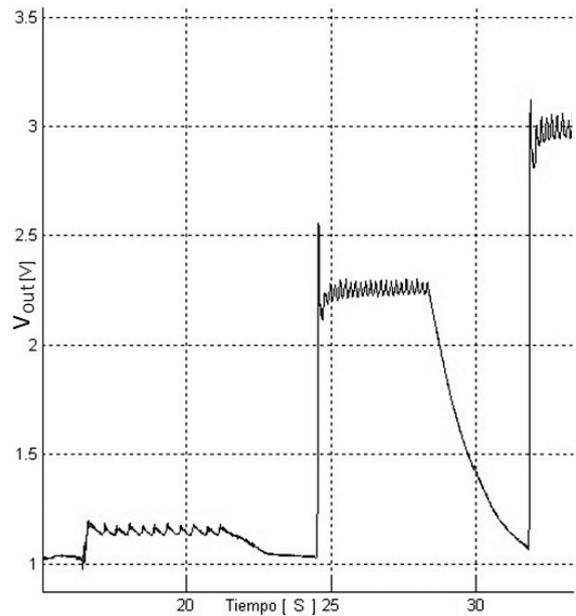
$$V_o = \sqrt{2g(H - h_1)} \quad (11)$$

El rango en frecuencia y en amplitud del generador son bajos, con presiones que dependen directamente de la columna de agua para la cual el dispositivo se construya y con frecuencias que dependen del tiempo que se demora la propagación de la onda de presión longitudinal [28] en aire y en agua hasta el sensor. La onda de presión inicia con la entrada de la presión atmosférica a través del tubo y se propaga por el agua hasta el sensor.

### Experimentación

Se evaluaron las características dinámicas de un sistema de medición de presión, el cual debe medir las fluctuaciones de presión en el fondo de un canal de laboratorio, para lo cual se utilizó el

generador descrito en el inciso anterior. Durante la señal rampa se registró la señal de salida en voltios (V) para la presión H equivalente a 3, 5, 7, 10, 12, 15, 20, 22, 25, 30, 35 y 40 cm de columna de agua (cm de H<sub>2</sub>O) respectivamente. La función escalón se aplicó variando las columnas de agua iniciales en  $h_1$  (5 cm de H<sub>2</sub>O) hasta 7, hasta 22 y hasta 32 cm de H<sub>2</sub>O respectivamente, es decir escalones de 2, 17 y 27 cm de H<sub>2</sub>O (Figura 4).



**Figura 4** Respuesta en el tiempo del sistema de medición a los escalones

El sistema de medición consiste básicamente en un sensor de presión instalado directamente sobre la superficie a medir (fondo del canal) y un sistema conversor análogo digital que almacena la señal en un computador. Sobre la superficie a medir se ubica el generador de presión, el cual se sella mediante el uso de empaques y la presión mecánica de una prensa de tornillo (figura 3).

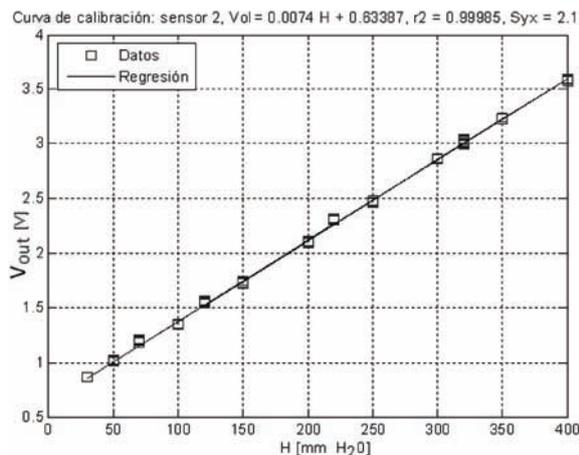
El sensor de presión piezoresistivo MPXV4006G [29], es auto-compensado por temperatura y está diseñado para aplicaciones en aire. Sin embargo estos sensores vienen con una capa de flourosilicona que sirve de aislante para proteger los circuitos eléctricos del contacto con el líquido, la cual a su vez recibe la presión y la transmite al

diafragma de silicio, lo que resulta en un cambio en la tensión de salida en proporción directa a la presión aplicada. Las características estáticas del sensor para aire son: 1)  $S_d$  igual a 7,51 mV/mm H<sub>2</sub>O y un  $V_{off}$  entre 0,152 y 0,378 V. 2) Rango en amplitud de 0 a 61,2 cm de H<sub>2</sub>O. 3) La incertidumbre del sensor es de 2.46% definiendo el  $V_{off}$  o del 5% sin definirlo.

El equipo de adquisición de datos (National Instruments) utilizado, permite la conversión de la señal análoga a digital proveniente del sensor piezoresistivo, acondicionando primero la señal con un filtro pasabajo de 200 Hz (Modulo SCXI-1102B) y posteriormente, se realiza el proceso de muestreo, cuantificación y codificación, para entregar la señal digital (Modulo SCXI-1600) que se almacena en un computador.

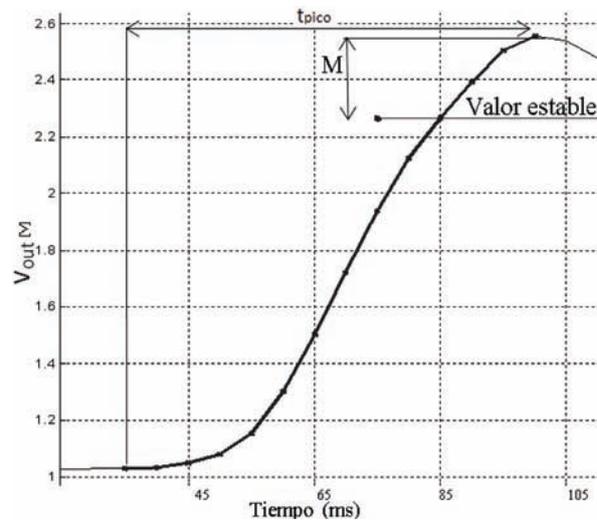
### Resultados

En la Figura 5 se observa la respuesta del sensor a la función rampa y de acuerdo a las capacidades del generador, se verifica la linealidad hasta una amplitud de 40 cm de H<sub>2</sub>O, comprobando que la sensibilidad (7,4mV/mmH<sub>2</sub>O) del MPXV4006G varía un poco con respecto a lo especificado por el fabricante al igual que el  $V_{off}$  (0,63 V). La resolución de A/D es cercana a 0,0001633%, por lo cual se puede desprestigiar el error en la determinación del  $V_{off}$  [30].



**Figura 5** Verificación de linealidad bajo la función rampa y determinación de la sensibilidad

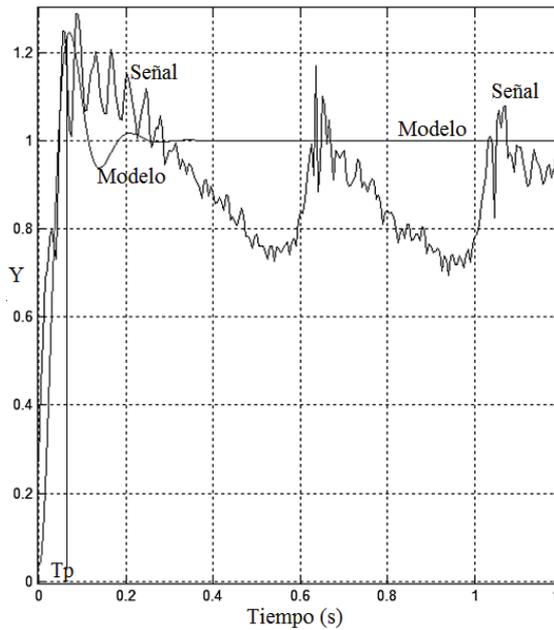
La respuesta del sensor a los escalones, refleja en la señal digitalizada (cada 5 milisegundos) un movimiento oscilatorio después del levantamiento, con un sobrepaso pronunciado del valor estable igual a  $24,6 \pm 4.7\%$  para un escalón de 2 y 17 cm de H<sub>2</sub>O (figura 4), típico de los sistemas de segundo orden y  $6,2 \pm 1.2\%$  para un escalón de 27 cm de H<sub>2</sub>O (figura 4). Los tiempos pico alcanzados en el sistema para cada escalón generado, estuvieron por debajo de 70 milisegundos (Figura 6).



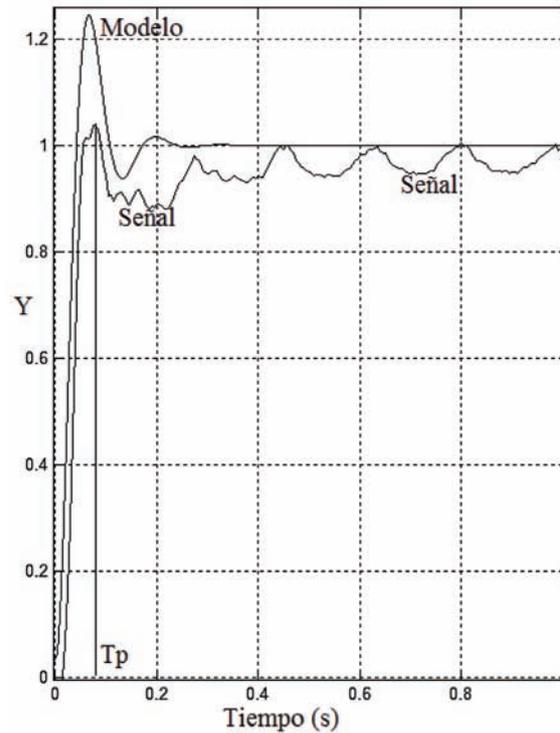
**Figura 6** Señal digital de un escalón en donde se observa el tiempo pico y el sobrepaso máximo

Para efecto de análisis, se adimensionan las señales de salida del sistema ante los escalones con sus amplitudes respectivas, denominándose el valor adimensional Y y así se aplica el modelo de segundo orden para una entrada de escalón unitario (figuras 7, 8 y 9).

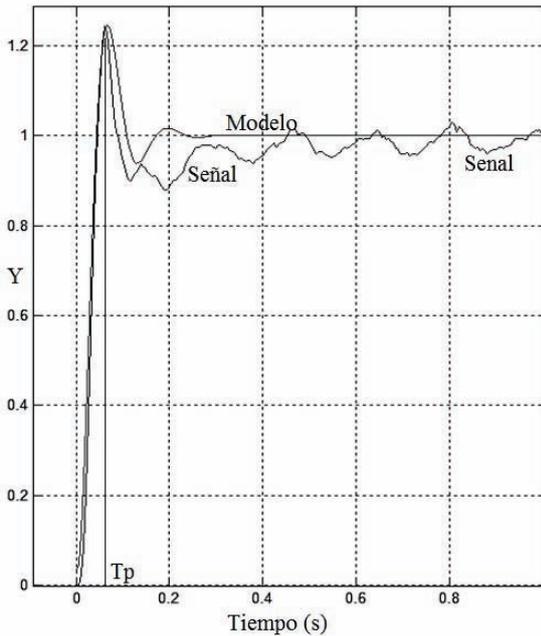
Por medio del sobrepaso máximo y el tiempo pico, se encontró un valor de  $\xi$  (amortiguamiento) igual a  $0,411 \pm 0.05$  para los dos primeros escalones (2 y 17 cm de H<sub>2</sub>O; figuras 7 y 8). Por su parte el  $\xi$  aumentó a  $0,664 \pm 0.03$  para el escalón de 27 cm de H<sub>2</sub>O (figura 9), valor que al sobrepasar el 20% del  $\xi$  de los otros escalones, inmediatamente cambia la frecuencia natural y con ello la función de transferencia



**Figura 7** Respuesta transitoria adimensional a un escalón de 2 cm de H<sub>2</sub>O



**Figura 9** Respuesta transitoria adimensional a un escalón de 27 cm de H<sub>2</sub>O



**Figura 8** Respuesta transitoria adimensional a un escalón de 17 cm de H<sub>2</sub>O

Para los dos primeros escalones en donde el  $\xi$  está próximo a  $0,411 \pm 0,05$ , la frecuencia natural ( $\omega_n$ ) se determinó en  $49,2 \pm 1,2$  rad/s y la frecuencia de resonancia ( $\omega_r$ ) en  $40,1 \pm 1,5$  rad/s. El ancho de banda (BW) fue de  $66,5 \pm 1,1$  rad/s (10,58 Hz), estableciendo así la frecuencia para la cual el sensor tiene la capacidad de detectar fielmente la señal.

En las figuras 7, 8 y 9 se compara la señal del sensor con el modelo construido con  $\omega_n$  (49,2 rad/s),  $\xi$  (0,41) y la función de transferencia para un sistema de segundo orden.

Para estimar el error por sobrepaso, se corrigió la señal digitalizada (200 Hz) mediante un filtro que eliminó las frecuencias superiores al ancho de banda del sensor (10,58 Hz), además se siguió el procedimiento presentado en la referencia [1]. La incertidumbre dinámica total de la medida, fue determinada en 8,82% con la ecuación 9, considerando  $\delta S_M$  de 2,95%,  $\delta S_d$  de 2,46% y  $\delta S_{Int}$  de 2,17%. Por último  $f$  fue igual a 2 para un nivel de confianza del 95%.

### Discusión

Las características dinámicas del sensor son obtenidas solo a partir del tiempo pico y de la magnitud del primer sobrepaso, pues el generador tiene la limitante de no permitir llegar a un valor estable bajo la función escalón, debido a las perturbaciones periódicas (5 Hz) por la presencia del burbujeo.

La sensibilidad del sensor piezoresistivo MPXV4006G fue establecida bajo la función rampa. Este parámetro también puede ser establecido por una calibración estática [3], debido a que la región lineal inicia desde una frecuencia de 0 Hz.

En la figura 9 con un escalón de 27 cm de H<sub>2</sub>O, el sensor ingresa a la zona de máxima capacidad en amplitud dinámica (zona de saturación), reflejado en el incremento súbito del amortiguamiento. Físicamente el sensor tiene una microcavidad en donde se soporta un diafragma que se deforma con la presión; al cambiar rápidamente de 5 a 32 cm de H<sub>2</sub>O, el diafragma experimentó un rápido amortiguamiento del sobrepaso conocido en este tipo de sensores como el efecto de parada [31]. De esta forma, el sensor en amplitud soportó los 40 cm de H<sub>2</sub>O bajo cambios graduales de presión, pero demostró no ser apto para cambios súbitos superiores a 27 cm de H<sub>2</sub>O, ya que el comportamiento del sensor cambia.

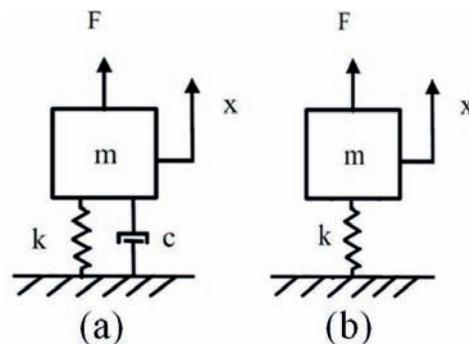
La frecuencia de corte superior que limita el rango útil del sensor en frecuencia (figura 1), sobrepasa la frecuencia de resonancia debido al amortiguamiento, ya que este aplaca la amplitud del pico de resonancia y no permite que sobrepase los 3dB, hasta que en una frecuencia mayor se genera su caída a -3dB, estableciéndose así el corte.

La pérdida del rango dinámico del sensor para la medición del fenómeno, implica que el sensor llega o sobrepasa los límites en cuanto a la mayor frecuencia que puede caracterizar, es decir hay una limitación en su tiempo de respuesta, lo que conlleva a que se incurra en “alisang” con frecuencias superiores. Por otra parte, si el sensor

trabaja en el rango no lineal de su sensibilidad, la señal de entrada sufre distorsión en la amplitud y se aumentan los errores, pues hay una superposición de las ondas [32].

Por último, al variar el fluido de trabajo es necesario una nueva calibración dinámica del sistema, ya que pueden ocurrir variaciones en los parámetros  $w_n$  y  $BW$ , puesto que  $w_n$  decrece en función del coeficiente de amortiguamiento de las fuerzas viscosas ( $C$ ). En la referencia [33], se deduce la frecuencia natural (ecuación (12)) y se discute como es afectada por el amortiguamiento en un sistema lineal de segundo orden con un solo grado de libertad (sistema masa - resorte con amortiguamiento; (Figura 10).

$$w_n = \sqrt{\frac{K}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} \tag{12}$$



**Figura 10** Modelo de un sensor de presión bajo una fuerza  $F$  con  $x(t)$  como el desplazamiento de la masa ( $m$ ), a) con amortiguamiento y b) sin amortiguamiento

No obstante en aire ( $C=0$ ), el sensor retorna al comportamiento de un oscilador armónico forzado convencional, en donde  $w_n$  está en función de la rigidez ( $K$ ) y de la masa ( $m$ ). Si  $w_n$  cae demasiado ( $C$  muy grande), se destruyen las características dinámicas del instrumento [2].

### Conclusiones

El principio de la botella de Mariotte implementado en el generador de presión, permite introducir la señal escalón y al estudiarlo junto con la señal

rampa, permite determinar las características dinámicas del sistema de medición de presión y la calidad de la información obtenida.

Variando la amplitud del escalón en la calibración dinámica, es posible verificar el rango en amplitud dinámica del sistema de medición de presión; operando dentro de este rango, en el sistema se mantienen los valores calculados de los parámetros  $\xi$ ,  $w_n$ , BW, evitando de esta manera, imprecisiones en la medida relacionadas con el tiempo y su amplitud.

La relación presión-tiempo del sensor se ajustó a un sistema de segundo orden, sin embargo se debe seguir trabajando en la reproducibilidad como una característica del generador de presión, la cual aunque no es esencial, al estar ausente obliga al uso de un transductor de referencia para mejorar la precisión en la caracterización dinámica de dispositivos [3].

### Agradecimientos

Se agradece al Laboratorio de Fluidos e Hidráulica de la Universidad del Valle por haber permitido realizar la experimentación.

### Referencias

- Z. Zhang, W. Wang, W. Wang, D. Wang. *Uncertainty of Measurement of Transient Pressure*. XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology. Lisbon, Portugal. 2009. pp. 6-11.
- Tatone G. *Selección de Transductores para la Medición de Presiones Fluctuantes*. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Punta del Este, Uruguay. 2010. pp. 5-9.
- The Instrumentation, Systems, and Automation Society (ISA 37.16.01). *A Guide for the Dynamic Calibration of Pressure Transducers*. 1<sup>st</sup> ed. Ed. Instrumentation, Systems, and Automation Society. Research Triangle Park. North Carolina, USA. 2002. pp.13-38.
- A. Diniz, A. Oliveira, J. Vianna, F. Neves. *Dynamic Calibration Methods for Pressure Sensors and Development of Standard Devices for Dynamic Pressure*. XVIII Imeko World Congress Metrology. Rio de Janeiro, Brazil. 2006. pp. 17-22.
- J. Zakrzewski, K. Wróbel. "Dynamic Calibration of Low-Range Silicon Pressure Sensors". *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. Vol. 51. 2002. pp.1358-1362.
- G. Kirouac. *Effect of Pressure Transmission Lines on the Frequency Response of Pressure Transducers*. Technical Report. Lockheed Martin Corporation, Schenectady. New York, USA. 2002. pp. 2-7.
- T. Stavros. *Measurement In Fluid Mechanics*. 1<sup>st</sup> ed. Ed. Cambridge University Press. New York, USA. 2005. pp. 3-54.
- J. Damion "Means of Dynamic Calibration for Pressure Transducers". *Journal Metrologia*. Vol 30. 1993. pp. 743-746.
- H. Himelblau, A. PierSol, J. Wise. M. Grundvig. *Handbook for Dynamic Data Acquisition and Analysis*. 1<sup>st</sup> ed. Ed. Institute of Environmental Sciences and Technology. Mount Prospect, Illinois, USA. 1994. pp. 3-92.
- B. C. Kuo. *Sistemas de Control. Automático*. 7<sup>a</sup> ed. Ed. Prentice Hall Hispanoamericana S.A. Naucalpan de Juárez, México. 1996. pp.77-117, 361-402.
- K. Ogata. *Ingeniería de Control Moderna*. 3<sup>ra</sup> ed. Ed. Prentice Hall. Naucalpan de Juárez. México. 1998. pp.134-207.
- G. Harman. *Sensor Technology Handbook*. 1<sup>st</sup> ed. Ed. Jon S. Wilson. Elsevier. Burlington, MA. USA. 2005. pp.411-433.
- Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM). *Evaluation of Measurement Data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. 1<sup>st</sup> ed. Ed. by Working Group of the Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM/WG 1). 2008. pp. 3-24. Disponible en: <http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html>. Consultado: Agosto de 2012
- R. Figliola, D. Beasley. *Theory and Design for Mechanical Measurements*. 5<sup>th</sup> ed. Ed. John Wiley & Sons. New Jersey, USA. 2011. pp. 161-200.
- S. Bell. *A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement*. Guide N° 11". National Physical Laboratory. Teddington, UK. 1999. pp. 9-40.
- J. Lally, D. Cummiskey. *Dynamic Pressure Calibration*. Technical Note No 15. PCB Piezotronics, New York, USA. 2003. pp.1-4.
- H. Newhall, A. Juhasz, D. Bullock. "Dynamic Pressure Calibrator". U.S. Patent. H000206. A. 3 February. 1987. pp.1-10.

18. K. Chung. *Shock Tube Calibration of a Fast Response Pressure Transducer*. Thesis to MSc. University of Texas at Arlington, Texas, USA. 1989. pp. 1-44.
19. S. Wang, T. Tsunga, L. Hana. "Method of Generating a Hydraulic Step Wave with a Short Rise Time". *Measurement*. Vol. 43. 2010. pp. 935-940.
20. T. Kobata, A. Ooiwa. "Method of Evaluating Frequency Characteristics of Pressure Transducers Using Newly Developed Dynamic Pressure Generator". *Sensors and Actuators A: Physical*. Vol. 79. 2000. pp. 97-101.
21. H. Chang, M. Kao, T. Tsung, J. Wu. "An Innovative Technology for Measuring the Dynamic Characteristics of Pressure Sensors". *Materials Science Forum*. Vol. 505-507. 2006. pp. 1057-1062.
22. L. Tomasi, E. Wieser, E. Baruah, D. Collomb, F. Jolly, G. Krötz, S. Storm, P. Jänker, E. Obermeier. *Development of a New Piezoelectric Dynamic Pressure Generator for High Pressure Periodic and Aperiodic Calibration*. XVII IMEKO World Congress Metrology in the 3<sup>rd</sup> Millennium. Dubrovnik, Croatia. 2003. pp. 1995-1998.
23. J. Holmes, R. Lewis. *The Dynamic Response of Pressure-Measurement Systems*. 9<sup>th</sup>. AFMC, Australasian Fluid Mechanics Conference. Auckland, New Zealand. 2009. pp. 537- 540.
24. R. Khaturia. *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators*. Georgia Institute of Technology. 1<sup>st</sup> ed. Ed. Marcel Dekker. Atlanta, USA. 2005. pp. 411-426.
25. C. Bowers, J. Toso. "Karnafuli Project: Model Studies of Sapillway Damage". *J. Hydraulic Engineering*, ASCE. Vol. 114. 1988. pp. 469-483.
26. G. Grimvall. *Brinteaser Physics*. 1<sup>st</sup> ed. Ed. The Johns Hopkins University Press. Baltimore. USA. 2007. pp. 33-53.
27. J. Maroto, J. Dios, F. de las Nieves. "Use of a Mariotte Bottle for the Experimental Study of the Transition from Laminar to Turbulent Flow". *Am. J. Phys.* Vol.70. 2002. pp. 698-701.
28. A. Strafaci. *Advanced Water Distribution Modeling and Management*. 1<sup>st</sup> ed. Ed. Haestad Press. Haestad Methods. Waterbury, USA. 2003. pp. 577-583.
29. T. Maudie, B. Tucker. *Reliability Issues for Silicon Pressure Sensors*. 8<sup>th</sup> ed. Ed. Sensor Device Data Book Motorola. Denver, USA. 2003. pp. 3-9.
30. A. Reodique. *AN1646, Noise Considerations for Integrated Pressure Sensors*. 1<sup>st</sup> ed. Ed. Motorola. Denver, USA. 2005. pp. 2-6.
31. V. Stankevič, Č. Šimkevičius. "Use of a Shock Tube in Investigations of Silicon Micromachined Piezoresistive Pressure Sensors". *Sensors and Actuators A: Physical*. Vol. 86. 2000. pp. 58-65.
32. M. Wilkinson, M. Outram. "Principles of Pressure Transducers, Resonance, Damping and Frequency Response". *Anaesthesia & Intensive Care Medicine*. Vol. 10. 2008. pp. 102-105.
33. T. Caughey, M. Kelly. "Effect of Damping on the Natural Frequencies of Linear Dynamic Systems". *J. of the Acoustical*. Vol. 33. 1961. pp. 1458-1461.