

# Calibración de tubos de Pitot con salida eléctrica

## INTRODUCCIÓN

Las empresas de acueducto y alcantarillado de Camaguey y Santa Lucía cuentan con 20 caudalímetros del tipo Pitot promediadores que fueron comprados inicialmente para ser aplicados en otras instalaciones. Ante la necesidad de reutilizar este equipamiento en las conductoras de dichas empresas fue necesario desarrollar una metodología para la calibración de estos instrumentos de medición.

La fabricación de este equipamiento fue realizado a la medida por el suministrador tomando en cuenta el diámetro interior y exterior de la tubería, la presiones de trabajo de dichas conductoras y los caudales mínimo y máximo a medir. Para reutilizar este equipamiento es necesario la calibración no solo del elemento primario, el Pitot como tal, sino también del elemento secundario, en este caso un transmisor de presión diferencias con salida 4-20mA a dos hilos.

Dado el rango de diámetros de estos caudalímetros, entre 150mm y 1000mm, fue necesario desarrollar dos procedimientos de calibración pues las instalaciones del laboratorio del Centro de Investigaciones Hidráulicas solamente permiten la calibración hasta diámetros de 250mm. En el caso de los diámetros superiores se propone la realización de la calibración in situ utilizando la conductora donde será finalmente instalado. En este trabajo se presentan los resultados prácticos de la calibración de dos equipos: uno realizado en el laboratorio y el otro en una conductora de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Santa Lucía.

## DESCRIPCIÓN DE LOS CAUDALÍMETROS

Por su principio de funcionamiento el Tubo de Pitot tiene como salida una diferencia de presión entre dos tomas. Conocida esta diferencia de presión se obtiene el caudal a partir de (1).

## Resumen / Abstract

*En este trabajo se presenta la calibración de caudalímetros del tipo Tubo de Pitot promediadores con salida eléctrica. Se describen los pasos para la calibración del elemento primario, formado por el Tubo de Pitot y el elemento secundario implementado con un transmisor de presión diferencial con salida 4-20 mA a dos hilos. También son descritos los procedimientos utilizados en el laboratorio del Centro de Investigaciones Hidráulicas para calibrar diámetros hasta 250 mm y cómo debe hacerse la calibración in situ en el caso de grandes diámetros. Se relacionan los resultados prácticos de dos ejemplos: uno para un caudalímetro de 150 mm calibrado en el laboratorio del CIH y otro de 400 mm calibrado en la conductora principal de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Santa Lucía.*

*Palabras clave: automatización, acueducto, registrador de variables.*

*In this work calibration of Pitot tube type flow meters is presented, for time-averaging flow meters and with electric output. Steps are described for the calibration of the primary element (Pitot tube) and the secondary element which has been implemented as a differential pressure transmitter with two wire 4-20 mA output. Also described are the laboratory procedures used in Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH) to calibrate diameters up to 250 mm and how in-situ calibration must be done in case of larger diameters. Practical results are illustrated with two examples: one for a 150 mm flow meter calibrated in CIH laboratory and another of 400 mm field-calibrated on the main pipe of the Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Santa Lucía.*

*Keywords: automatization, water pipes, variable regulator.*

Dr. Jorge Ramírez Beltrán, CIH, CUJAE, e-mail: jramirez@cih.cujae.edu.cu

Dr. Alcides León Méndez, CIH, CUJAE, e-mail: aleonm@cih.cujae.edu.cu

Ing. Daniel Vega Fernández, CIH, CUJAE, e-mail: daniel@cih.cujae.edu.cu

Ing. Enrique Sánchez Arias, Director Técnico Empresa Acueducto Santa Lucía, Camaguey e-mail: enrique@acsl.hidro.cu

$$Q = K_p \sqrt{\Delta P} \quad (1)$$

Donde  $Q$  es el caudal,  $K_p$  es la constante de calibración y  $\Delta P$  es la diferencia de presión. Para la medición de la diferencia de presión se coloca un medidor de presión diferencial para convertir esa diferencia de presión en una señal eléctrica. Por las características específicas de los Tubos de Pitot FLO-BAR del fabricante CT Platon estos ya vienen con el medidor de presión diferencial acoplado y el manifold, con las válvulas de aislamiento y equalización, forma parte del cuerpo del Tubo de Pitot. En la Fig. 1 se pueden observar sus partes. Es a la salida del manifold, que está conectado el medidor de presión diferencial ( $\Delta P$ ) [1]. Tomando en cuenta lo anterior, por necesidades de la aplicación, pudiera cambiarse el medidor de  $\Delta P$  por el de otro Tubo de Pitot, por ejemplo, para aumentar el rango de gastos a medir.

El modelo de Tubo de Pitot FLO-BAR tiene varios orificios de medición para la presión correspondiente a la carga velocidad. En la bibliografía este tipo de caudalímetro es conocido como Tubo Annubar o Tubo de Pitot Annubar. El objetivo de varios orificios para medir la carga velocidad es promediar hidráulicamente las diferentes velocidades presentes en el perfil consiguiéndose con esto una menor afectación por la variación del perfil de velocidades, si se compara con los Pitot que miden en un solo punto de la tubería. Sin embargo, aunque en menor medida, continúan siendo sensibles a las variaciones en el perfil de velocidades y cualquier variación de este por perturbaciones en el fluido afecta la medición. Todos los fabricantes de caudalímetros dan las distancias mínimas aguas arriba y aguas abajo que debe colocarse el caudalímetro respecto a diferentes accesorios típicos para evitar que las perturbaciones que causan estos accesorios afecten la medición. La tabla I presenta estas restricciones para la instalación.

En las instrucciones para la instalación y localización de los caudalímetros el manual del vendedor tiene orientaciones muy estrictas. Este tipo de medidor se hace a pedido y es muy sensible a las dimensiones de la tubería para obtener un correcto posicionamiento del Tubo de Pitot con respecto al perfil de velocidades por ser calibrado en la fábrica de acuerdo a las dimensiones que da el comprador. Tomando en cuenta que estos medidores ya no serán colocados en los lugares para los que fueron diseñados, algunas de estas restricciones, sobre todo las relacionadas con el diámetro de la tubería ya no tienen por que cumplirse y será hecha por los especialistas del CIH una calibración en cada caso, pudiéndose colocar incluso un caudalímetro en un diámetro de tubería mayor que aquel para el que fue diseñado.

Las restricciones de localización respecto a los diferentes accesorios aguas arriba y aguas abajo del medidor

deben ser respetadas, no obstante, en el caso que sea necesario instalarlo en determinado lugar donde no puedan cumplirse algunas de estas restricciones, es posible, realizando una calibración in situ, minimizar las afectaciones que esto pueda ocasionar.

### **CALIBRACIÓN DEL CAUDALÍMETRO DE 150 MM**

Para la calibración del caudalímetro de 150mm se utilizó un banco de calibración existente en el Centro de Investigaciones Hidráulicas. El mismo consta de un tanque de carga constante que es alimentado por una estación de bombeo y una tubería de varios diámetros que descarga en un canal. Este canal tiene un vertedor triangular de descarga libre que funciona como elemento aforador de caudal.

En (1) se presentó la ecuación general de dependencia del caudal con la diferencia de presión para un tubo de Pitot. Como en este caso el caudalímetro ya tiene acoplado un medidor de diferencia de presión con salida eléctrica se puede expresar el caudal ( $Q$ ) en función de una corriente de salida ( $I$ ).

$$Q = f(I) \quad (2)$$

La ecuación que representa el funcionamiento del medidor de presión diferencial se representa en (3):

$$\Delta P = K_I (I - I_0) \quad (3)$$

Donde  $\Delta P$  es la diferencia de presión,  $K_I$  es la constante de calibración,  $I$  es la corriente medida a la salida del medidor e  $I_0$  es la corriente de salida cuando la diferencia de presión es cero. Para obtener la expresión matemática de (2) se sustituye (3) en (1) y se obtiene (4):

$$Q = K \sqrt{I - I_0} \quad (4)$$

En este caso la nueva constante  $K$  es la constante de calibración del caudalímetro que debe ser hallada experimentalmente usando la instalación del CIH.

El caudalímetro fue colocado en la tubería de 150mm cumpliendo las especificaciones para la instalación dadas por el fabricante. A la salida del medidor de presión diferencial se colocó un miliamperímetro digital para la lectura de la corriente de salida. Después de purgar el Pitot usando las válvulas correspondientes se determinó la corriente  $I_0$  midiendo la salida del miliamperímetro con caudal cero. Esta corriente debe ser 4 mA según las especificaciones del medidor de presión diferencial pero puede no ser así debido a corrientes propios del cero de este medidor o a la influencia de su posición de montaje respecto a la horizontal. Posteriormente se procede a abrir la válvula de regulación de caudal que se encuentra aguas

TABLA I- RESTRICCIONES DE LOCALIZACIÓN RESPECTO A LOS ACCESORIOS TÍPICOS

Tipo de Accesorio	Diámetros aguas arriba dentro del plano	Diámetros aguas arriba fuera del plano	Diámetros aguas abajo
Codo	6	8	3
"Te"	6	8	3
Dos codos en el mismo plano	9	12	3
Dos codos en planos diferentes	12	20	4
Expansión de diámetro	7	8	3
Contracción de diámetro	7	8	3
Válvulas de regulación	20	20	4

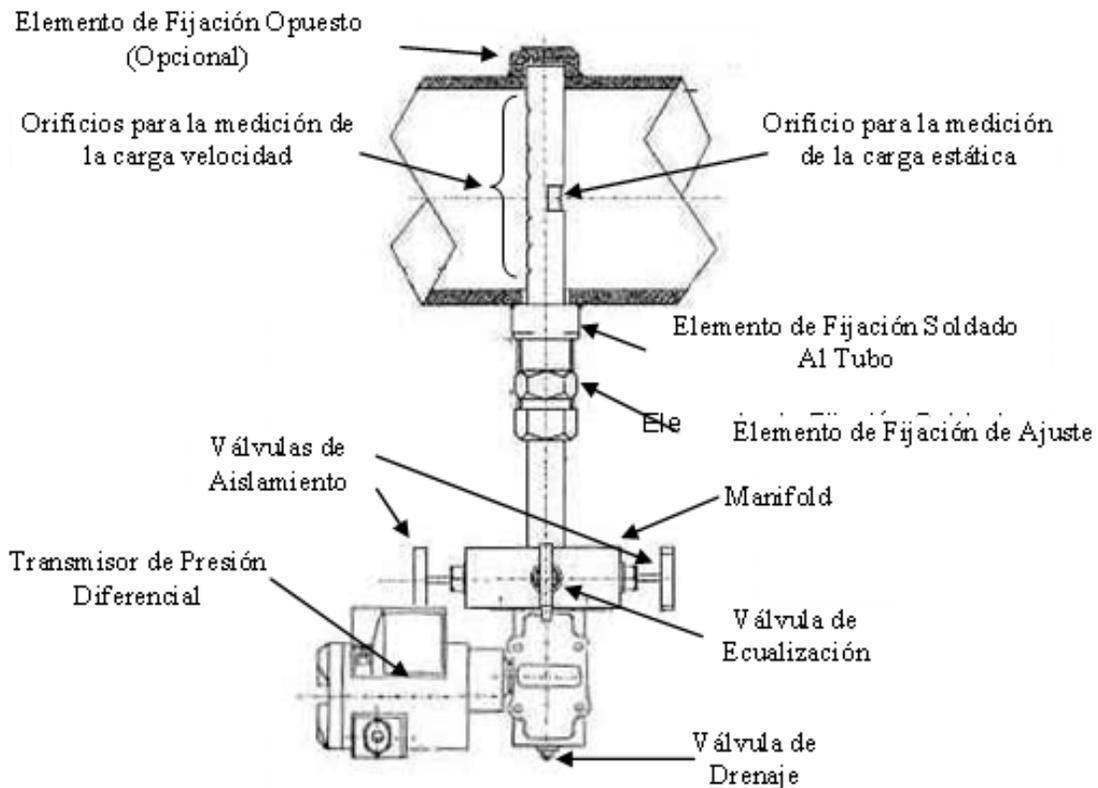


Fig. 1. Partes de los Tubos de Pitot Flo-BAR del fabricante CT Platon.

abajo del caudalímetro para tomar los datos a seis caudales diferentes. Como el caudal se mide en un vertedor debe esperarse el tiempo adecuado para la estabilización del flujo después de modificar la abertura de la válvula. Para determinar el caudal se realizaron tres lecturas con la mira de la altura del agua en el vertedor. En la tabla II se presentan los datos adquiridos.

Los datos adquiridos deben ser procesados para obtener la constante de calibración  $K$ . Primeramente se promedian las tres lecturas correspondientes a la altura sobre el vertedor obteniéndose la media de cada una de ellas. A este valor se le resta el cero de la mira que fue trasladado desde el vértice del vertedor y que en este caso es de 69.05 cm. Los nuevos valores se corresponden con la altura sobre el vértice del vertedor y estos

valores son convertidos a caudal usando la fórmula de Kindsvater y Shen e implementada en la ISO 1438 [2].

Finalmente se le resta a los valores de corriente medidos el valor de la corriente de salida para caudal cero, que en este caso fue de 4.00 mA. En la tabla III se muestran los datos de altura sobre el vértice del vertedor ( $h$ ) y los de caudal ( $Q$ ) y corriente ( $I-I_0$ ) usados para encontrar la ecuación final del caudalímetro. Esto se hace usando la función linfit de MathCAD para obtener la constante  $K$  de (4) que mejor ajusta los valores de caudal y corriente [3]. Esta constante tiene un valor de 15.13 cuando la corriente se define en mA y el caudal el l/s. La función que define el comportamiento de este caudalímetro se define en (5).

$$Q = 15.13\sqrt{I - I_0} \quad (5)$$

**TABLA II- DATOS ADQUIRIDOS PARA LA CALIBRACIÓN DEL CAUDALÍMETRO DE 150 MM**

Altura en el vertedor (cm)			Corriente(mA)
79.96	79.97	79.95	4.10
84.47	84.50	84.50	4.74
86.06	86.05	86.07	5.20
88.46	88.46	88.46	6.30
89.52	89.52	89.52	7.02
90.42	90.44	90.43	7.75

**TABLA III- DATOS USADOS PARA HALLAR LA FUNCIÓN DEL CAUDALÍMETRO DE 150 MM**

h (cm)	Q (l/s)	I-I <sub>0</sub> (mA)
10.91	5.496	0.10
15.44	13.019	0.74
17.01	16.559	1.20
19.41	22.982	2.30
20.47	26.226	3.02
21.38	29.217	3.75

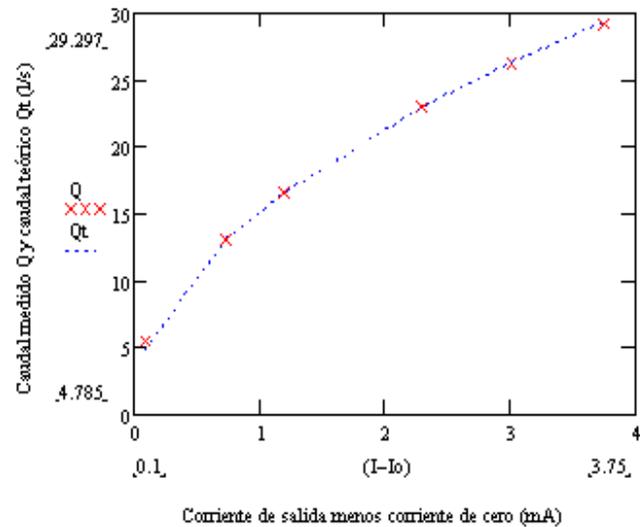
En la Fig. 2 se presentan los valores de caudal medidos, representado por Q y la función teórica obtenida en (5) representada por Q<sub>t</sub> graficados contra la corriente I-I<sub>0</sub>. En la Fig. 3 se reproduce el error entre los valores de caudal medidos y los obtenidos según la función teórica, relativo al intervalo de medida del caudalímetro.

**■ CALIBRACIÓN DEL CAUDALÍMETRO DE 400 MM**

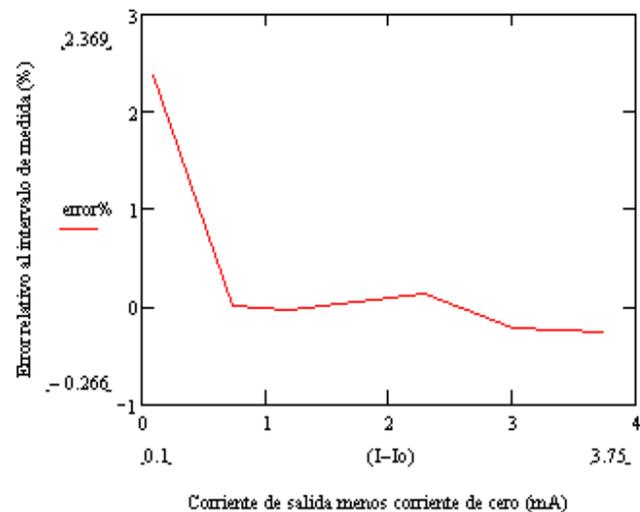
La calibración del caudalímetro de 400 mm debió realizarse en el propio lugar donde sería instalado dado que por su diámetro no podía utilizarse el laboratorio del CIH. Además como el mismo sería conectado a un equipo Indicador-Registrador Hidrosen debía separarse la calibración en dos partes: obtener la función del medidor de presión diferencial, lo que podía ser realizado en el CIH y obtener la función del caudalímetro, que tenía que ser in situ. Esto se debe a que el Indicador-Registrador Hidrosen, desarrollado en el CIH, permite que a su entrada sea conectada una señal eléctrica proporcional al ΔP de un caudalímetro y el mismo calcula la raíz de ΔP y lo multiplica por la constante K que se le programe [4]. Dada esta facilidad se decidió realizar la calibración en dos partes y no como en el caso del caudalímetro de 150 mm.

**A. Calibración del medidor de presión diferencial.**

Para calibrar el medidor de presión diferencial por separado se colocó en la toma de presión positiva una manguera conectada al fondo de un tanque cuyo nivel permanece constante. La toma de presión negativa queda abier-



**Fig.2 Gráfico del caudal medido y el caudal teórico en función de la corriente.**



**Fig.3 Gráfico del error relativo en función de la corriente.**

ta a la presión atmosférica El medidor es fijado a un medidor vertical de distancia de un metro de longitud con resolución de 0.1 mm. Al mover la altura del medidor de ΔP se varía la presión en su entrada positiva por variación de la carga hidrostática. De esta forma se obtienen las co-

rrientes de salida para varios puntos de altura conocida. En la tabla IV se presentan los datos adquiridos para la calibración del medidor de  $\Delta P$ .

**TABLA IV- DATOS ADQUIRIDOS PARA LA CALIBRACIÓN DEL MEDIDOR DE  $\Delta P$**

Altura Relativa (cm)	Corriente (mA)
95	5,03
90	6,64
85	8,26
80	9,85
75	11,46
70	13,06
65	14,68
60	16,31
55	17,88
50	19,50

Usando la función linfit de MathCAD se obtiene la ecuación de la recta que mejor ajusta los puntos medidos. Esta ecuación de la recta se define en (6) donde  $I$  es la corriente de salida del medidor en mA y  $h$  la altura relativa en cm.

$$I = -0.3214 \cdot h + 35.574 \quad (6)$$

Conociendo que este medidor tiene un rango de salida de 4 a 20 mA se evalúa la ecuación de la recta encontrada para 4 mA y así se conoce a que altura relativa la presión en el medidor sería cero. Esta altura es de 98.239 cm. Esto se hace porque la posición absoluta del cero del medidor no es necesario encontrarla ahora pues este depende de la posición de montaje y cuando se instale es que debe medirse correctamente. Trabajando matemáticamente sobre (6) se despeja  $h$  y se le resta el valor de 98.239 para obtener la ecuación que relaciona la salida de corriente del medidor con la presión aplicada a su entrada positiva. Esta ecuación se presenta en (7) y es la función que caracteriza el funcionamiento del medidor de presión diferencial cuando la presión se expresa en centímetros de columna de agua (chicha) y la corriente en mA.

$$I = 0.3214 \cdot \Delta P + 3.998 \quad (7)$$

Con esta ecuación obtenida se podrá entonces conocer, cuando se esté calibrando in situ el Tubo de Pitot, el valor de  $\Delta P$  correspondiente a la  $I$  que se esté midiendo.

### **B. Calibración del Tubo de Pitot.**

Para calibrar el Tubo de Pitot in-situ debe colocarse en la conductora siguiendo las normas de instalación del fabricante. Aguas abajo de este lugar y también cumpliendo

con los requisitos de instalación, se realizó un segundo registro para colocar el medidor de caudal que se usará como referencia, en este caso un medidor de caudal ultrasónico. Como los caudalímetros ultrasónicos dependen de varios parámetros físicos de la tubería donde está instalado se verificó su correcto funcionamiento realizando una medición de caudal mediante un Tubo de Pitot Colé mediante el método de la Transversa. Esta medición se hizo de la forma tradicional y sin ningún equipo con salida eléctrica.

El primer paso después de la correcta instalación del caudalímetro es medir la corriente de cero. Esto se realiza con caudal cero y después de realizar la purga. Para medir corriente se decidió utilizar el propio Registrador-Indicador Hidrosen. Este permite configurarse de forma tal que se convierte en un indicador de corriente. Después de preparada correctamente la instalación la corriente de cero medida fue de 4.02 mA.

Posteriormente se enciende el equipo de bombeo conectado a la conductora donde se encuentra el caudalímetro a calibrar y mediante la válvula de regulación de caudal que existe en la instalación se realizan las mediciones correspondientes de corriente de salida del caudalímetro y de caudal que está circulando utilizando el caudalímetro ultrasónico. Los datos adquiridos se muestran en la tabla V.

**TABLA V- DATOS ADQUIRIDOS PARA LA CALIBRACIÓN DEL TUBO DE PITOT.**

Caudal (l/s)	Corriente (mA)
58	4.75
62	4.97
66	5.06
70	5.15
73	5.26
77	5.32
81	5.42
82	5.45

Para obtener la relación entre caudal y  $\Delta P$  debemos obtener los valores de  $\Delta P$  que produjeron la corriente medida. Para eso se utiliza la ecuación obtenida en la calibración del medidor de  $\Delta P$  y representada en (7). La corriente medida debe ser corregida por el desajuste de cero que existe entre la corriente de cero del caudalímetro ya instalado y la corriente de salida de (7) cuando el  $\Delta P$  es cero. Este valor de corrección se calcula hallando la diferencia entre los valores antes mencionados, o sea restarle a 4.02 mA el valor de 3.998 mA dando un valor de 0.022 mA. A cada valor de corriente medida se le resta este valor de corrección y se obtiene el valor de  $\Delta P$  que lo produjo despejando en (7). En la tabla VI se presentan los valores usados para el cálculo de la ecuación del Tubo de Pitot.

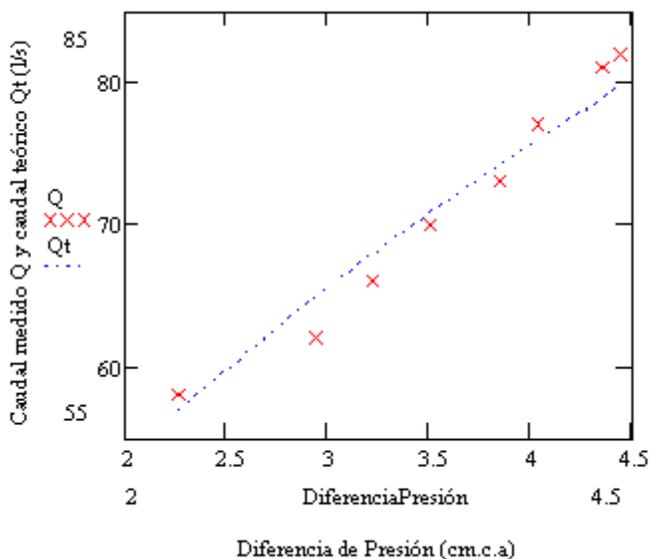
Esta ecuación es de la forma expresada en (1) por lo que usando la función linfit de MathCAD y los datos de la tabla VI se calcula la constante K quedando la ecuación:

$$Q = 37.796 \cdot \sqrt{\Delta P} \tag{8}$$

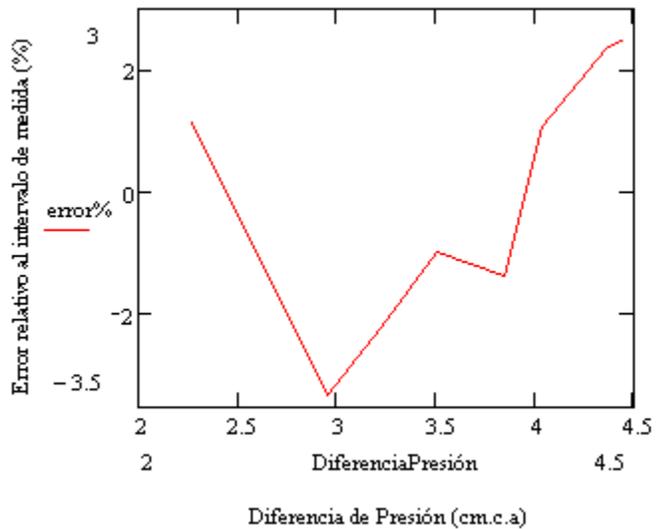
En la Fig. 4 se presentan los valores de caudal medidos, representado por Q y la función teórica obtenida en (8) representada por  $Q_t$  graficados contra la diferencia de presión. En la Fig. 5 se reproduce el error entre los valores de caudal medidos y los obtenidos según la función teórica, relativo al intervalo de medida del caudalímetro.

**TABLA VI- DATOS USADOS PARA HALLAR LA FUNCIÓN DEL TUBO DE PITOT**

Caudal (l/s)	$\Delta P$ (cm.c.a)
58	2.271
62	2.956
66	3.236
70	3.516
73	3.858
77	4.045
81	4.356
82	4.449



**Fig.4 Gráfico del caudal medido y el caudal teórico en función de la diferencia de presión...**



**Fig.5 Gráfico del error relativo en función de la diferencia de presión.**

**CONCLUSIONES**

Se presentaron los pasos para la calibración de Tubos de Pitot con salida eléctrica. Mediante dos ejemplos se mostraron dos formas de calibrar estos equipos: obteniendo la función general del caudalímetro u obteniendo la función del Tubo de Pitot independientemente de la del medidor de presión diferencial. En ambos casos se obtuvieron las ecuaciones que permiten el uso de estos equipos en los sistemas de medición automatizados.

**RECONOCIMIENTOS**

Los autores agradecen a las Empresas de Acueducto y Alcantarillado de Camaguey y Santa Lucía por el apoyo financiero para la realización de esta investigación y a Aguas Habana por la colaboración en la adaptación del banco de calibración del CIH.

**REFERENCIAS**

[1] FLO-BAR, Operation and Maintenance Manual OMM1035. Averaging Pitot Tube Flowmeter. GEC ALSTHOM RESEAU COMERCIAL FRANCE, 1995.  
 [2] ISO 1438-1:1180. Water flow measurement in open channels using weirs and Venturi flumes -- Part 1: Thin-plate weirs.  
 [3] Mathsoft Engineering & Education, "MathCAD 13 User's Guide," Cambridge, January 2006  
 [4] J. Ramírez, D. Vega, M. Gómez y A. León, "Registador de Variables para la automatización de sistemas hidráulicos," Ingeniería Hidráulica y Ambiental, vol. XXVIII, No. 2, pp. 72-76, 2007.