

CONSTRUCCION Y CALIBRACION DE ANEMOMETROS DE BAJA VELOCIDAD

I. De Paul, C. Cadena, G. Lesino y L. Saravia

INENCO#, Universidad Nacional de Salta
Buenos Aires 177 - 4400 Salta

Resumen

El estudio experimental de los fenómenos de convección natural requiere anemómetros de baja velocidad, en el rango de 0 a 1.5 m/S. Teniendo en cuenta su costo elevado y las dificultades de importación se ha decidido plantear su desarrollo y construcción en laboratorio. A esos efectos es necesario estudiar dos aspectos: el diseño del instrumento en sí y el diseño de un sistema de calibración preciso para bajas velocidades.

El método de calibración consiste en establecer un flujo laminar en una cañería en cuyo centro se coloca el sensor. Para medir el flujo de aire en la cañería se conecta ésta a un depósito cilíndrico hermético que se llena de agua para luego producir su descarga a través de un orificio calibrado. El descenso del agua produce la succión del aire a través de la cañería. La velocidad de descarga del líquido puede medirse con buena precisión y ello se relaciona directamente con el flujo de aire. En el presente trabajo se discuten los aspectos constructivos y las diversas causas de error en la medida.

El anemómetro diseñado tiene tres rangos de medida y trabaja con un error menor del 2.5% en la escala más baja y 2% en la alta. Las medidas son compensadas automáticamente en temperatura. El principio de operación está basado en el uso de dos termistores en el sensor. Uno de ellos es calentado por un circuito de control electrónico y el sistema de medida sensa el efecto de enfriamiento provocado por la corriente de aire a medir. El otro termistor, a temperatura menor, provee la compensación necesaria para corregir los efectos producidos

por el cambio de la temperatura del aire a medir.

1. Introducción

Dentro del campo de la tecnología solar es muy importante el fenómeno de convección natural como mecanismo de transferencia térmica, por lo cual es necesario medir velocidades de aire en rangos bajos: 0 - 1.5 m/seg. Dado que los anemómetros que miden en este rango son de muy alto costo y es necesario importarlos, se decidió plantear el desarrollo y construcción de anemómetros para bajas velocidades en los laboratorios del INENCO a partir de elementos accesibles en el mercado argentino, y en lo posible, de bajo costo. Esto impone asimismo, la necesidad de desarrollar simultáneamente un sistema de calibración suficientemente preciso para este rango de velocidades, con las mismas características de economía y diseño simple.

En el presente trabajo se describe los estudios y experiencias realizados en ambos aspectos. Por razones de claridad el trabajo fue dividido en tres partes: desarrollo, construcción y ensayo del sistema de calibración; desarrollo, construcción y ensayo del anemómetro; calibración del anemómetro, análisis de resultados y conclusiones.

2. Desarrollo, construcción y ensayo del sistema de calibración

2.1 Conceptos generales

Para lograr la calibración de un anemómetro es necesario colocar el sensor en un flujo de aire cuya velocidad se conoce. Esto se logra mediante el dispositivo esquematizado en la Fig.1, cu

yo principio de funcionamiento se describe a continuación.

suficiente precisión la velocidad de descarga del agua, con el fin de establecer la correlación con el valor máximo de velocidad en el perfil parabólico, con el menor error posible.

2.2 Dimensionamiento del tubo

Para tener flujo laminar en el tubo, el número de Reynolds debe ser menor que 2100 (1). Si se emplea un tubo de 1.9 cm de diámetro, fácilmente adquirible en el mercado y tomando como referencia la densidad y viscosidad del aire a 20°C, resulta que la máxima velocidad admisible en el tubo es de 1.7 m/seg. Por lo tanto, con tubos de ese diámetro se puede trabajar dentro del rango de interés.

Por otra parte, para tener en el tubo un flujo completamente desarrollado, es decir, un perfil parabólico de velocidades, debe respetarse la siguiente relación entre diámetro y largo del tubo (2):

$$L_e \approx 0.058 D Re$$

donde D es el diámetro del tubo y L_e se define como aquella distancia en la cual la velocidad en el eje del tubo alcanza el 99% de su valor final.

Calculando el Re para la máxima velocidad de interés, 1.5 m/seg. resulta $L_e = 2.0$ m, por lo cual la longitud del tubo debe ser $L \approx 2$ m.

2.3 Correlación entre la velocidad del aire en el tubo y la velocidad de descarga

El perfil de velocidades en un tubo de longitud L y radio R, con flujo laminar es (3):

$$v(r) = \frac{\Delta PR^2}{4\mu L} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

que tiene un máximo en $r = 0$.

La velocidad promedio en el tubo está relacionada con la velocidad máxima por: $V_t = V_{max}/2$

Si el dispositivo es hermético y el aire se supone incompresible, debe ser: $V_t A_t = v A$ (ver Fig.1)

$$v_{max} = \frac{2vA}{A_t}$$

Dado que el sensor del anemómetro es puntual, lo que mide no es exactamente

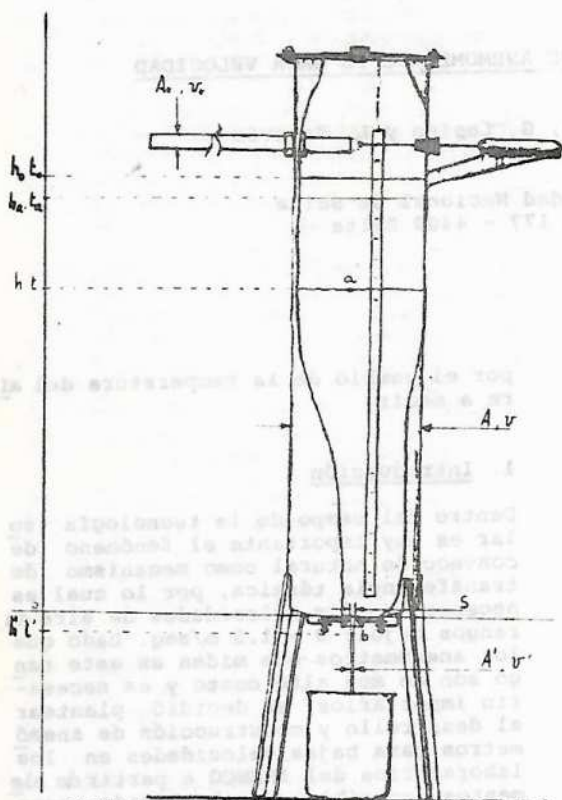


FIGURA 1: DETALLE DEL CALIBRADOR

Se establece un flujo laminar en un tubo largo conectándolo con un depósito de agua cilíndrico, hermético, que se descarga a través de un orificio calibrado. El descenso del agua produce la succión del aire a través del tubo y se establece una correlación entre la velocidad máxima en el tubo y la velocidad de descarga del agua, que puede medirse con buena precisión. Colocando el sensor del anemómetro delante del extremo del tubo, se calcula la velocidad del aire que incide sobre él y se relaciona este valor con la lectura que se obtiene en la escala del anemómetro.

Se distinguen dos aspectos importantes en el principio de funcionamiento del calibrador: a) el dimensionamiento correcto del tubo, con el fin de lograr un flujo laminar y tener un perfil de velocidades completamente desarrollado (parabólico) en el extremo de salida; b) lograr medir con

v_{max} sino que promedio de la velocidad sobre un área igual al área del sensor expuesta al flujo. Esto introduce un factor de forma, FF, que depende de la geometría del sensor, de modo tal que la velocidad medida por el anemómetro es:

$$v = v_{max} \cdot FF \text{ con } FF < 1$$

2.4 Determinación de la velocidad de descarga

Notación: el índice o corresponde a los valores iniciales de las variables; el índice R indica los valores correspondientes a un nivel arbitrario elegido como referencia; sin índice indicaremos los valores correspondientes a la superficie libre en un instante cualquiera de la descarga; con una prima indicaremos los valores correspondientes a la vena de agua en contracción completa.

Para determinar la velocidad de descarga del agua se aplica la ecuación de Bernoulli a los puntos a y b de la figura. El punto a se toma sobre la superficie libre del agua, y el punto b en la vena de descarga en contracción completa.

Se obtiene:

$$v' = \left[2g \left\{ \frac{v^2}{2g} + \frac{(p-p')}{\rho g} + (h+h') - hp \right\} \right]^{1/2} \text{ con } h' \text{ o } \quad (1)$$

donde hp representa la pérdida de carga en el orificio. En b la vena está en contracción completa y por lo tanto en equilibrio con el ambiente. Por lo tanto $p=p'$ =presión atmosférica. Se puede mostrar que el término $v^2/2g$ es despreciable frente a $(h+h')$, y por lo tanto, introduciendo el coeficiente de velocidad C_v resulta:

$$v' = C_v \left[2g (h + h') \right]^{1/2} \quad (2)$$

El área de la vena contraída se expresa a través del coeficiente de contracción C_c : $A' = C_c S$. Introduciendo el coeficiente de descarga $C_d = C_v C_c$, resulta:

$$v(h) = \frac{C_d S}{A} \sqrt{2g (h + h')} \quad (3)$$

Para determinar completamente $v(h)$ es necesario conocer C_d y h' . Como es muy difícil medir h' se debe determinar indirectamente mediante un ajuste analítico de la curva de descarga h en función del tiempo t , lo mismo que el coeficiente de descarga C_d .

Analizando el volumen de agua evacua

do entre los instantes t_R y t , resulta:

$$h(t) = \beta^2 (t-t_R)^2 - 2\beta \sqrt{h_R+h'} (t-t_R) + h_R$$

$$\beta = \frac{C_d S \sqrt{2g}}{2A}$$

Realizando un ajuste analítico

$$h(T) = aT^2 + bT + c \quad (4)$$

de los valores medidos h y $T = (t - t_R)$, se determinan los coeficientes a , b y c que tienen la siguiente expresión:

$$a = \beta^2 \quad \text{de donde} \quad C_d = \frac{2A}{S} \sqrt{a/2g}$$

$$b = -2\beta \sqrt{h_R+h'} \quad h' = b^2/4a - h_R$$

$$c = h_R$$

Reemplazando estos valores en (3) se calcula v como función de la altura, a partir de la medición de h en función de t .

2.5 Medición de h en función de t

Para medir la altura de la superficie libre del agua en función del tiempo se empleó el circuito simple esquematizado en la Fig. 2.

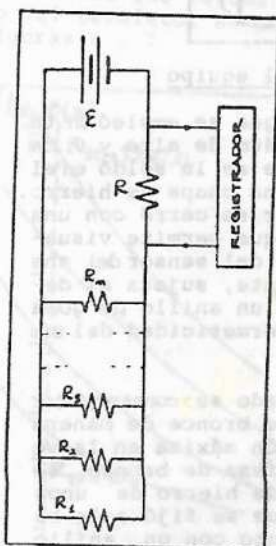


Fig. 2

En el calibrador, el circuito se cierra a través del agua que actúa como un conjunto de resistencias R_i conectadas en paralelo por medio de pares de puntas conductoras sumergidas en el agua a distintas alturas. Al descender el agua, la resistencia total del circuito cambia en forma discontinua, pro

vocando una variación también discontinua en la caída de tensión a los bornes de una resistencia externa R. Esta caída de tensión se mide con un registrador, obteniéndose así una lectura del instante en que la superficie libre pasa por la posición de cada par de puntas. Los detalles constructivos del sensor se indican en la Fig. 3.

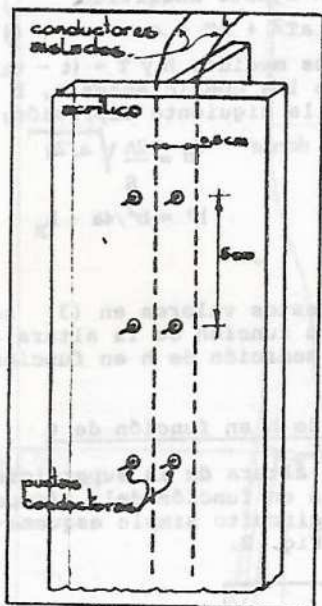


Fig. 3
Detalle
del
sensor

2.6 Descripción del equipo

Como depósito de agua se empleó un tubo de hierro de 1.40m de alto y 0.35m de diámetro, al que se le soldó en el extremo inferior una chapa de hierro. El extremo superior se cerró con una placa de acrílico que permite visualizar la ubicación del sensor del anemómetro correctamente, sujeta al depósito a través de un anillo de goma para asegurar la hermeticidad del sistema.

El orificio calibrado se construyó torneando una pieza de bronce de manera de tener contracción máxima en la vena de agua. Esta pieza de bronce se soldó a una placa de hierro de unos 10cm de diámetro que se fijó a la base del depósito junto con un anillo de goma para evitar pérdidas. Esta placa de hierro puede reemplazarse por otra que tenga un orificio calibrado de distinto diámetro, permitiendo de esta manera calibrar en distintos rangos de velocidades, al variar la descarga (ver Fig. 1).

El tubo es de PVC de 1.9cm de diámetro

y 2.10m de largo, sostenido con soportes para evitar que se deforme por el peso, y está sujeto al depósito por medio de tuercas. En el depósito se hicieron perforaciones enfrentando al tubo, y perpendicular a él, para poder calibrar el anemómetro en distintas posiciones respecto a la dirección del flujo.

El sensor del circuito eléctrico consiste en una placa de acrílico de 1.30m de alto por 5 cm de ancho, atravesada por puntas conductoras separadas entre sí 0.5cm en sentido horizontal, y 5 cm en sentido vertical. Estas puntas están unidas entre sí en la parte posterior de la placa por medio de un conductor aislado, de modo tal que el agua actúe como resistencia colocada entre las puntas más próximas (ver Fig. 3). En el circuito se empleó una fuente de 6 volts y una resistencia externa de 400Ω . El tiempo de descarga se midió con un registrador Rikadenki, a velocidades de 30cm/min y 60cm/min.

2.7 Comparación con un anemómetro patrón

A los efectos de comprobar la viabilidad del método y el equipo construido, se compararon los valores de velocidad calculados a partir de la fórmula (3) con los valores leídos en una sonda patrón TSI-1640 omnidireccional, contra escalas en los rangos 0 a 0.30 m/seg. 0.25 a 1.2 m/seg. y 1.0 a 3.0 m/seg.

Se analizaron los resultados de cinco series de medidas, realizándose el ajuste analítico (4) en cada una de ellas. Se calcularon los valores medios y la dispersión en los coeficientes de ajuste, y a partir de éstos se determinó C_d , h' y h_r . Los resultados se muestran en las Figuras 4 y 5, y en Tabla 1.

El error en la velocidad se determinó por propagación de errores en la fórmula (3), expresada en función de los coeficientes de ajuste, y empleando la dispersión en éstos calculada en forma estadística. Los valores calculados concuerdan con los leídos con un error menor del 4% en el rango 0.25 a 1.2 m/seg., y menor del 12% en el rango 0. a 0.30 m/seg. Los resultados obtenidos se consideraron satisfactorios y por lo tanto se procedió a la calibración del anemómetro construido en el Instituto.

ALTURA	VELOCIDAD	ERROR EN	ERROR	Coefficientes
CM	M/SEG	M/SEG	%	
120	1.81	0.04	2.2	a = 1.388 x 10 ⁻⁴
115	1.77	0.04	2.3	b = -0.2617
110	1.73	0.04	2.3	c = 120.00
105	1.69	0.04	2.4	
100	1.65	0.04	2.4	C _d = 0.697
95	1.61	0.04	2.5	h' = 1.35 cm
90	1.57	0.04	2.5	h _r = 120.00 cm
85	1.53	0.04	2.6	
80	1.49	0.04	2.7	
75	1.45	0.04	2.7	
70	1.41	0.04	2.8	
65	1.37	0.04	2.9	
60	1.33	0.04	3.0	
55	1.29	0.04	3.1	
50	1.25	0.04	3.2	
45	1.21	0.03	3.3	
40	1.17	0.03	3.4	
35	1.13	0.03	3.5	
30	1.09	0.03	3.6	
25	1.05	0.03	3.7	
20	1.01	0.03	3.8	
15	0.97	0.03	3.9	
10	0.93	0.03	4.0	
5	0.89	0.03	4.1	
0	0.85	0.03	4.2	
0	0.81	0.03	4.3	
0	0.77	0.03	4.4	
0	0.73	0.03	4.5	
0	0.69	0.03	4.6	
0	0.65	0.03	4.7	
0	0.61	0.03	4.8	
0	0.57	0.03	4.9	
0	0.53	0.03	5.0	
0	0.49	0.03	5.1	
0	0.45	0.03	5.2	
0	0.41	0.03	5.3	
0	0.37	0.03	5.4	
0	0.33	0.03	5.5	
0	0.29	0.03	5.6	
0	0.25	0.03	5.7	
0	0.21	0.03	5.8	
0	0.17	0.03	5.9	
0	0.13	0.03	6.0	
0	0.09	0.03	6.1	
0	0.05	0.03	6.2	
0	0.01	0.03	6.3	

Tabla 1

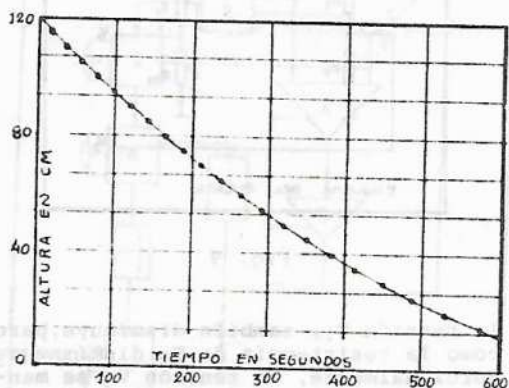


Fig. 4

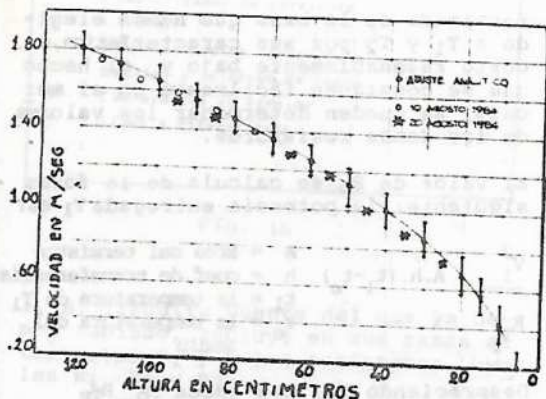


Fig. 5

3. Desarrollo, construcción y ensayo del anemómetro

3.1 Conceptos generales

La relación entre la pérdida de calor de un cuerpo y la velocidad de un gas, en el seno del cual está dicho cuerpo ha sido estudiada frecuentemente en anemometría. Ultimamente, debido al perfeccionamiento y popularidad de los termistores, éstos se han venido usando en reemplazo de los clásicos "hilos calientes".

Los termistores con coeficiente negativo de temperatura, NTC, son resistores no lineales, cuyo valor depende en alto grado de la temperatura. El coeficiente típico de los NTC puede abarcar valores entre -3 y -6%/°C a la temperatura ambiente.

La relación entre la resistencia y la temperatura es aproximadamente:

$$R = Ae^{-B/T}; \quad B = \frac{\ln R_1 - \ln R_2}{T_1^{-1} - T_2^{-1}}$$

donde R es el valor de la resistencia a la temperatura T, y A y B son constantes.

Dos curvas que resumen el comportamiento del termistor se pueden ver en las Figuras 6 y 7

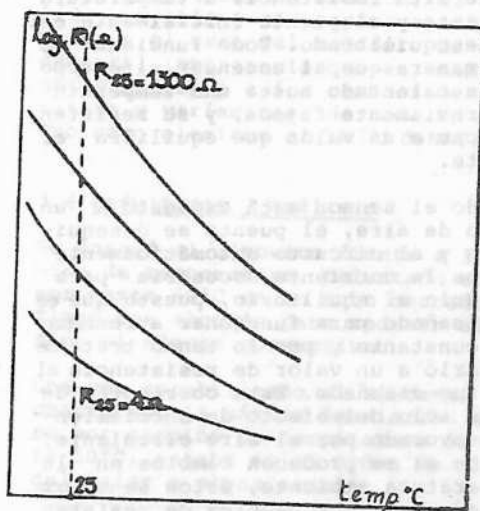
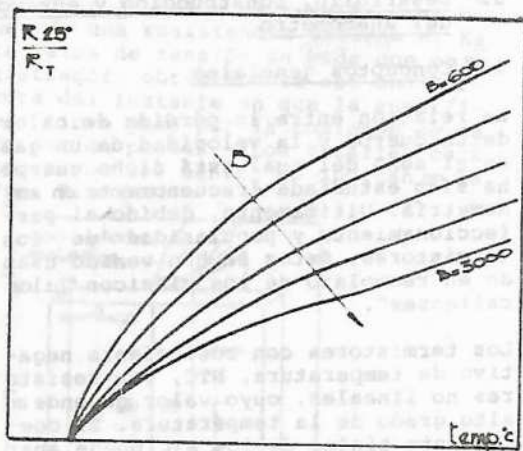


Fig. 6



3.2 Principio de medición

Este instrumento tiene en su circuito sensor dos termistores del tipo: $R_{25} = 500 \Omega$, $B = 2960 \text{ }^\circ\text{K}$, $TC = 4.2\% / ^\circ\text{K}$; uno calentado a 80°C (T_1) por un circuito electrónico, y otro, "frío" (T_2) que sensa la temperatura ambiente; ambos termistores se encuentran expuestos al flujo que se quiere medir.

El circuito incluye un puente resistivo, donde en una de sus ramas está ubicado el termistor "caliente". Ambos termistores poseen una relativamente alta resistencia a temperatura ambiente y el puente inicialmente está desequilibrado. Todo funciona de tal manera que al encender el equipo T_1 es calentado hasta una temperatura previamente fijada, y su resistencia cae a un valor que equilibra el puente.

Cuando el sensor está expuesto a un flujo de aire, el puente se desequilibra y el circuito automáticamente provee la corriente necesaria para volverlo al equilibrio, puesto que está diseñado para funcionar a resistencia constante y por lo tanto trata de llevarlo a un valor de resistencia al que fue diseñado. Esta corriente depende sólo del efecto de enfriamiento provocado por el aire circulante, ya que si se producen cambios en la temperatura ambiente, éstos se ven compensados por los cambios de resistencia del termistor T_2 . Un esquema simplificado de este comportamiento, puede observarse con este modelo que se ve en las Figuras 8 y 9.

Si la resistencia de T_1 disminuye por un aumento de temperatura ambiente,

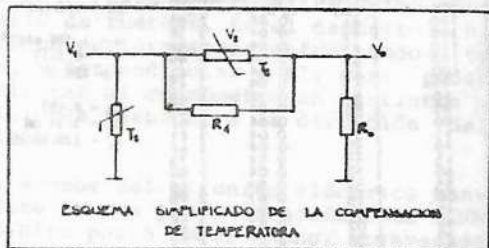


Fig. 8

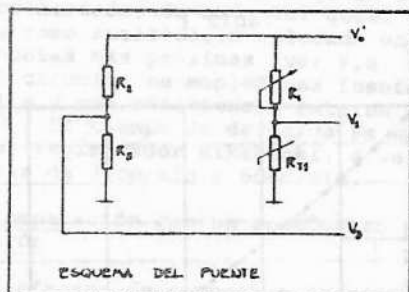


Fig. 9

la tensión V_1 , también disminuye, pero como la resistencia de T_2 disminuye proporcionalmente, la tensión V_0 se mantiene constante. Las resistencias R_4 y R_0 hacen que los cambios en V_1 y V_2 por efecto de las variaciones de temperatura ambiente se anulen.

Partiendo de la base que hemos elegido a T_1 y T_2 por sus características, su costo razonablemente bajo y el hecho que se consiguen fácilmente en el mercado, se pueden determinar los valores de los demás resistores.

El valor de R_0 se calcula de la forma siguiente: la potencia entregada T_1 es:

$$\frac{V_1^2}{R_{T1}} = A \cdot h \cdot (t_1 - t_e)$$

A = área del termistor
 h = coef. de transferencia
 t_1 = la temperatura de T_1
 t_e = la temperatura del medio

Despreciando R_4 , nos queda $R_0 = \frac{R_{Te}}{4}$

El valor de R_4 se lo determinó experimentalmente y se llegó a la conclusión que:

$$R_4 \text{ opt.} = 20 R_{Te} \text{ además } \frac{R_2}{R_3} \ll \frac{R_1}{R_{T1}}$$

La temperatura t_1 se obtiene de la máxima temperatura del aire que se quiere medir. Para fines prácticos $t_1 > 1,2 \text{ teMAX}$

3.3 Descripción del circuito

Básicamente el circuito se puede dividir en ocho bloques como se ilustra en la Fig. 10

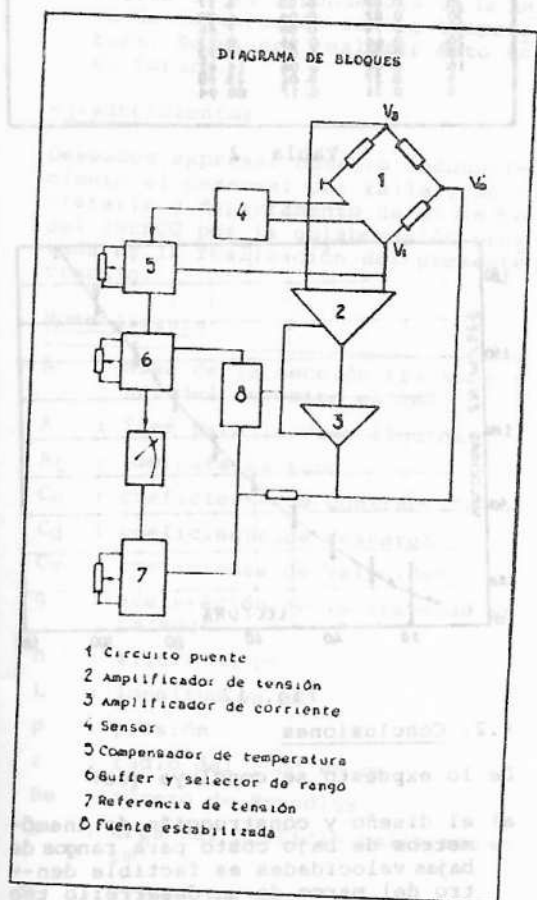


Fig. 10

1. El circuito puente del que ya hemos hablado, incluye en sus ramas al termistor T_1 y a los resistores lineales R_1 , R_2 y R_3 .

2. El amplificador no tiene ningún requerimiento especial, por lo que cualquier amplificador operacional puede funcionar correctamente. La única condición es que "K", para todos los valores de K_{T_1} , sea:

$$K \gg \frac{1}{\frac{R_1}{R_{T_1}} - \frac{R_3}{R_2 + R_3}}, \text{ siendo } K \text{ la ganancia del amplificador}$$

En nuestro caso, usamos el LF 351 de NATIONAL.

3. El requisito para el amplificador de corriente es que provea la corriente necesaria para calefaccionar a T_1 , ya que tanto el LF 351, como la mayoría de los amplificadores operacionales no pueden hacerlo. En nuestro caso usamos un circuito "Darlington" compuesto por un transistor 2A92 y un TIP29. La resistencia R_L actúa sobre este par, de forma tal que no hayan picos de corriente.

4. En el sensor se encuentran los termistores. Están montados sobre acrílico y adosados a una varilla hueca de bronce de .8 cm de diámetro y 25 cm de largo.

5. El sistema de compensación de temperatura está formado por el termistor T_2 , una red divisora de tensión y algunas resistencias lineales para "aplanar" la característica del termistor.

6. Otro de los bloques es un "buffer" o etapa separadora. Está ubicada allí, a fines de adaptar impedancias. Se incluyen acá unos presets de ajuste de rango o sensibilidad.

7. La referencia de tensión, es de salida variable y sirve para ajustar escalas y el cero del medidor. Es de fundamental importancia que se mantenga estable frente a los cambios de temperatura y variaciones de red. En nuestro caso elegimos el LM723 de NATIONAL.

3.4 Resultados y análisis

Se ensayó el circuito frente a los cambios de temperatura, calentado el sensor hasta 60°C en un tubo cerrado y relleno con algodón para reducir al mínimo el efecto convectivo.

Una vez estabilizado el sistema, se controló que la máxima desviación de cero por cambios de temperatura de hasta 50°C , estaba en el orden de 1,5 % del valor a plena escala.

La probable fuente de error estaría en el hecho que las características de T_1 y T_2 no sean idénticas.

Estos ensayos fueron hechos para evaluar la deriva por temperatura del cero. Los resultados obtenidos en el tú

nel de viento se encuentran discutidos en otra sección.

Este sistema podría mejorarse por un lado, introduciendo un amplificador de raíz cuadrada para linealizar la respuesta, para aprovechar mejor la escala, descomprimiendo los valores; y por otra parte, reemplazando los termistores, de los llamados "isocurvicos", más pequeños y esféricos.

4. Calibración del anemómetro, análisis de resultados y conclusiones

4.1) Calibración y análisis

El anemómetro construido, cuyo esquema se muestra en la Fig. 11, se calibró ubicando el sensor de modo tal que la sección mayor estuviera perpendicular al flujo (posición 1).

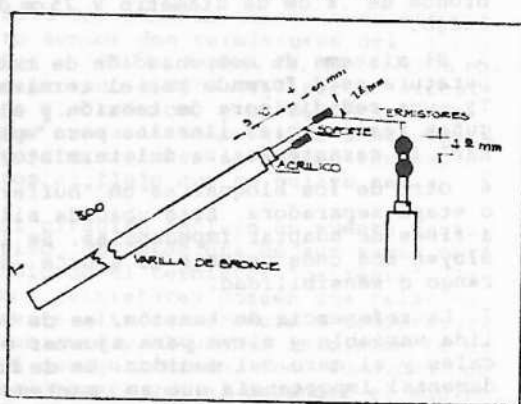


Fig. 11

Se realizó cinco series de medidas y a partir del ajuste analítico de la curva de descarga se determinó la velocidad empleando los valores promedio de los coeficientes. Los resultados se resumen en la Fig. 4 y en la Tabla 2. Se observa que la incerteza en el valor de la velocidad es menor que el 5% salvo en el último tramo de la descarga ($h \ll 15$ cm). Después se estableció la correlación con las lecturas del sensor a partir de un ajuste analítico. La curva de calibración resultante se muestra en la Fig. 12. Los valores leídos en la escala del anemómetro tienen una dispersión menor del 2%.

Posteriormente se repitió el procedimiento con el sensor paralelo al flujo (posición 2), obteniéndose resultados coincidentes con los anteriores.

ALTIMETRIA CM	VELOCIDAD M/SEG	ERROR EN M/SEG	ERROR %	Coefficientes
120	1.58	0.06	3.77	a = 1.402 x 10 ⁻⁴ b = -0.2614 c = 119.97 C ₁ = 0.701 h' = 1.88 cm h _r = 119.97 cm
115	1.61	0.06	3.72	
110	1.67	0.06	3.49	
105	1.73	0.06	3.54	
100	1.79	0.06	3.43	
95	1.85	0.06	3.27	
90	1.91	0.05	2.66	
85	1.97	0.05	2.51	
80	2.03	0.05	2.47	
75	2.09	0.05	2.39	
70	2.15	0.05	2.31	
65	2.21	0.05	2.27	
60	2.27	0.05	2.19	
55	2.33	0.05	2.13	
50	2.39	0.05	2.07	
45	2.45	0.05	2.01	
40	2.51	0.05	1.95	
35	2.57	0.05	1.89	
30	2.63	0.06	1.83	
25	2.69	0.06	1.77	
20	2.75	0.06	1.71	
15	2.81	0.06	1.65	
10	2.87	0.06	1.59	
5	2.93	0.06	1.53	
0	2.99	0.17	5.68	

Tabla 2

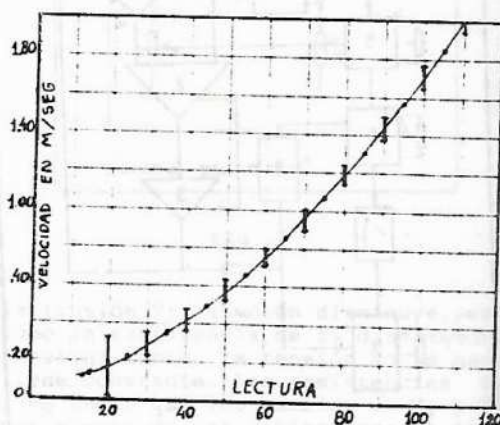


Fig. 12

4.2. Conclusiones

De lo expuesto se concluye que:

- el diseño y construcción de anemómetros de bajo costo para rangos de bajas velocidades es factible dentro del marco de un desarrollo tecnológico simple, obteniéndose resultados con una precisión del 3% en las lecturas;
- el método de calibración desarrollado es adecuado, pudiendo implementarse con equipos de diseño simple y bajo costo, obteniéndose una precisión del 5% suficientemente buena de acuerdo a los fines para los cuales fue pensado;
- el diseño del anemómetro puede mejorarse empleando sensores de menor tamaño, que introduzcan menos

perturbación en el flujo;

d) el paso inmediato es repetir las experiencias empleando un orificio calibrado de menor diámetro con el fin de obtener un rango de velocidades más bajo;

e) dado que las medidas de esta experiencia fueron realizadas con temperatura ambiente entre 12°C, y 20°C, no se obtuvo información acerca de la dependencia de la curva de calibración con la temperatura. Se espera realizar esto en el futuro.

Agradecimientos

Deseamos expresar nuestro reconocimiento al personal del taller, secretaría y departamento de diseño del INENCO por la colaboración prestada en la realización del presente trabajo.

Nomenclatura

- A : área de la sección transversal del depósito en cm^2
A' : ídem para la vena líquida
A_t : ídem para el tubo
C_c : coeficiente de contracción
C_d : coeficiente de descarga
C_v : coeficiente de velocidad
g : aceleración de la gravedad en cm/seg^2
h : altura en cm
L : longitud en cm
p : presión
r : radio del tubo en cm
Re : número de Reynolds
S : área del orificio calibrado en cm^2
t : tiempo en segundos
v : velocidad en cm/seg .

Referencias

1. Batchelor G.K. "Fluid Mechanics"
2. Whitaker, S.: "Introduction to fluid mechanics"- cap. 5
3. King.H.W.; Brater, E.F.: "Manual de hidráulica" sec. 3 y 6

4. Maiztegui y Gleiser; "Introducción a las mediciones de laboratorio"; cap. 6.