

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN PSICRÓMETRO DIGITAL ASPIRADO

Jesús Alfredo Dávila, Enrique Martínez López
 Centro Nacional de Metrología, División de Termometría
 Km. 4,5 Carretera a los Cués, El Marqués, Qro., México
 2 11 05 00 ext. 3395, jdavila@cenam.mx, emartine@cenam.mx

Resumen: En el Laboratorio de Humedad del CENAM se desarrolló un psicrómetro digital tipo aspirado para medir humedad relativa y temperatura. En este trabajo se presenta el desarrollo de las etapas del instrumento, así como las pruebas de operación, calibración y validación de resultados. El alcance de medición del prototipo va desde 10 % a 90 % en humedad relativa con una incertidumbre de $\pm 2,1$ %, y en temperatura desde 0 °C a 50 °C con una incertidumbre expandida de $\pm 0,06$ °C.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente existe una gran variedad de instrumentos para la determinación de humedad relativa, sus principios de operación se basan en propiedades eléctricas, mecánicas y físicas de algunos materiales que son sensibles a la humedad. Algunos de los problemas frecuentes que presentan son debidos a las propiedades del elemento sensor, entre los cuales se encuentran, la histéresis, no linealidad, efectos por temperatura, flujo del aire y presión entre otros. Esto representa una desventaja al poner en riesgo la confiabilidad de las mediciones realizadas con este tipo de instrumentos.

El psicrómetro es uno de los instrumentos más sencillos y exactos para determinar la humedad relativa, para lo cual solo requiere de mediciones en temperatura y presión.

En la mayoría de los psicrómetros comerciales, para conocer el valor de humedad relativa, es necesario el uso de tablas psicrométricas que tienen resoluciones de 1 % de humedad relativa o mayor, lo que representa una desventaja cuando se requieren de mediciones de alta exactitud, además de ser necesaria una corrección por presión (usualmente las tablas son generadas a una presión de 101 325 Pa).

El psicrómetro digital desarrollado en el laboratorio de humedad del CENAM soluciona algunos inconvenientes presentes en los psicrómetros comerciales. En este trabajo se presentan el desarrollo y características metrológicas.

2. MARCO TEÓRICO.

El principio de operación del psicrómetro se basa en la medición de temperatura de dos termómetros idénticos, uno de estos tiene una funda que cubre al bulbo, la cual esta hecha con tela de fibras naturales (algodón, lana, muselina etc.), que se encuentra humedecida constantemente debido a efectos de capilaridad (figura1).

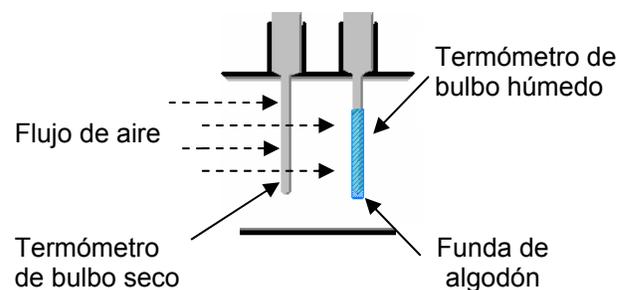


Fig. 1 Esquema básico de un psicrómetro

Cuando se le hace circular un flujo de aire sobre los termómetros, el bulbo húmedo experimenta un enfriamiento debido a la evaporación del agua presente en la funda. La diferencia de temperatura del bulbo húmedo y el seco está relacionada directamente con la cantidad de agua en el ambiente [1].

El cálculo de humedad relativa por el método psicrométrico se realiza mediante la siguiente ecuación.

$$\%HR = \frac{e(t_d)}{e(t_s)} = \frac{e(t_h) - A \cdot P(t_s - t_h)}{e(t_s)} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

P = presión atmosférica (Pa).
 $e(t_h)$ = presión parcial de vapor de agua (Pa).
 $e(t_s)$ = presión vapor de agua saturado (Pa).
 $e(t_d)$ = presión vapor de agua a la temperatura de punto de rocío (Pa).
 t_s = temperatura del bulbo seco.
 t_h = temperatura del bulbo húmedo.
 A = constante psicrométrica.

La constante psicrométrica A , depende del calor latente de evaporación del agua, de la temperatura del bulbo húmedo y de la velocidad del aire que pasa sobre los termómetros. El valor de A se puede determinar de acuerdo a [2] por medio de la siguiente ecuación.

$$A = 0.00066 \cdot (1 + 0.00115 \cdot t_h) \quad (2)$$

En un psicrómetro aspirado, se requiere que la velocidad del flujo del aire este dentro del intervalo de 3 m/s a 5 m/s [2].

Por otro lado, la presión de vapor en Pascales está dada en [2], por medio de la siguiente ecuación.

$$\ln e(t_s) = \sum_{i=1}^4 g_i \cdot T^{i-2} \quad (3)$$

Donde:

$$\begin{aligned} g_1 &= -0,63536311 \times 10^4 \\ g_2 &= 0,3404926034 \times 10^2 \\ g_3 &= -0,19509874 \times 10^{-1} \\ g_4 &= 0,12811805 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

El cálculo de humedad relativa en el prototipo desarrollado, se realiza mediante las ecuaciones antes descritas.

3. DESARROLLO DEL PROTOTIPO

3.1. Partes del psicrómetro

Termómetros

Los termómetros empleados en el desarrollo del HR-103 son de resistencia de platino tipo industrial (PT100), con los cuales es posible realizar el acondicionamiento electrónico para determinar la temperatura, además de ser instrumentos que

mejoran la exactitud en las mediciones de temperatura.

Túnel de viento

El túnel de viento se construyó con vidrio ya que cumple con la característica de ser un material no higroscópico. El diseño permite mantener un flujo laminar a lo largo del túnel que es una condición necesaria para este instrumento [2]. Otros materiales que se pueden emplear para construir el túnel son acero inoxidable, nailon o aluminio.

Funda de algodón

La funda utilizada está hecha de algodón de tal manera que el vástago del termómetro húmedo quede completamente cubierto, fue conveniente mantener un contacto físico adecuado entre la funda y el termómetro para lograr la depresión total del bulbo húmedo.

Fuente de agua

Se utilizó agua desionizada para mantener húmeda la funda del termómetro durante las pruebas, ya que la presencia de impurezas, como las sales contenidas en el agua común, puede aumentar la depresión del bulbo húmedo, y por lo tanto afectar a las lecturas de humedad.

Fuente de aire

La fuente de aire consiste en un ventilador colocado en la parte posterior del túnel de viento. Con éste, el aire adquiere una velocidad de 4,8 m/s el cual se encuentra entre los límites especificados (3 m/s a 5 m/s) por la norma ASTM-E337 [2] para este tipo de psicrómetros.

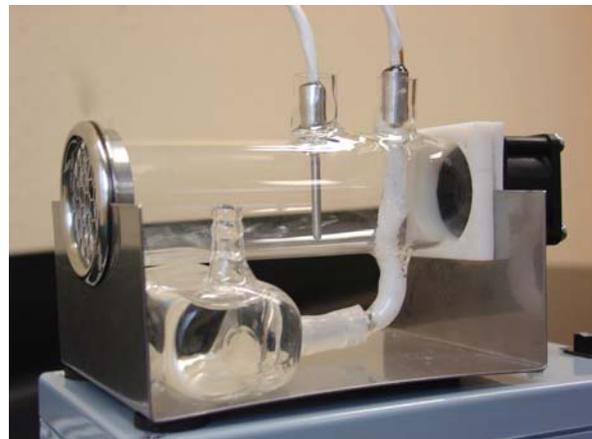


Fig. 2 Sistema mecánico del HR-103

3.2. Sistema electrónico y software

El sistema electrónico está compuesto por varias etapas, las cuales se muestran en la figura 3.

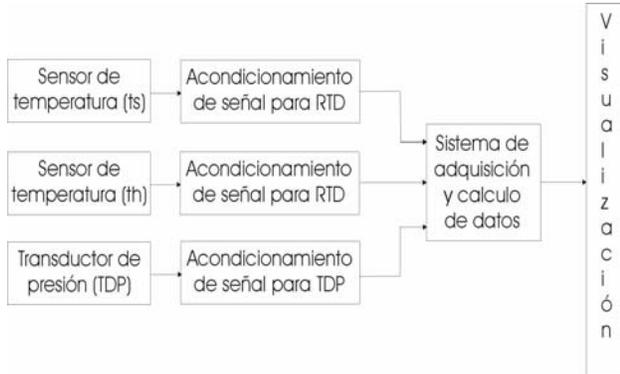


Fig. 3 Diagrama a bloques de sistema electrónico

3.2.1 Acondicionamiento de señal para RTD

Para medir temperatura con el RTD, se diseñó una fuente de corriente continua a 1 mA. El método consiste en hacer circular una corriente constante a través del termómetro y medir la caída de tensión en éste, para posteriormente interpretarla mediante una función empírica de equivalencia que relaciona la tensión eléctrica y la temperatura.

En el diseño de la fuente de corriente (figura 4), se usó la configuración de convertidor de tensión a corriente, en el cuál, se implementó un diodo zener con compensación en temperatura para generar $V_{referencia}$ (figura 4), con este dispositivo se garantiza que la estabilidad en corriente continua no afecte a la medición en temperatura.

La tensión generada en el resistor del termómetro es amplificada para una obtener una señal de 5 V a 50 °C y 0 V a 0 °C. Con la finalidad de eliminar el ruido eléctrico, la configuración usada en la etapa de amplificación es en Rechazo de Modo Común. Los niveles de tensión máximos generados en el termómetro con una corriente de 1 mA son del orden de 20 mV, por lo tanto, la amplificación es aproximadamente 250 veces.

3.2.2 Acondicionamiento de señal para TDP

Para realizar la medición de presión atmosférica se incluyó un transductor que tiene un alcance de medición de 15 kPa a 115 kPa. Esto representa una ventaja, debido a que las tablas psicrométricas

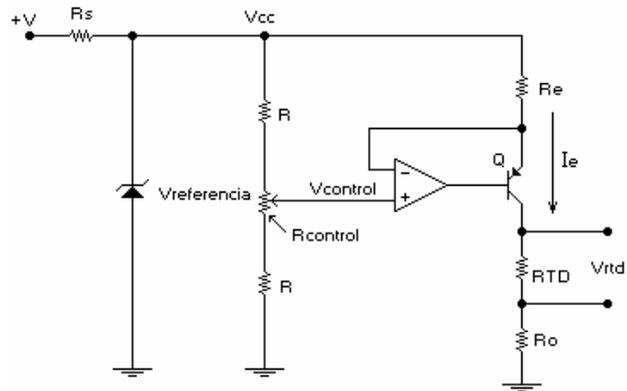


Fig. 4. Esquema básico de fuente de corriente

acoplamiento de impedancias, ya que el transductor tiene incluido un acondicionamiento que va de 0,5 V a 4,5 V que cubre de ésta manera el alcance de medición.

3.2.3 Sistema digital

Las señales obtenidas de cada acondicionamiento, son tratadas en un convertidor analógico a digital (A/D) de 10 bits de resolución, lo que equivale una resolución en temperatura de 0,03 °C y 80 Pa en presión. El convertidor A/D, está incluido en un microcontrolador PIC16F877, el cuál se ha programado con las ecuaciones y constantes necesarias para obtener el valor de humedad relativa. Debido a que el PIC16F877 no es posible programar ecuaciones exponenciales (mencionado en la ecuación 3), fue necesario hacer una aproximación con un polinomio de orden 6.

El lenguaje utilizado es un compilador en ambiente de programación C. El microcontrolador tiene la función de comunicación vía RS-232 configurado a 9600 baudios, 8 bits de datos y 1 bit de paro. Este puerto de comunicación se utilizó para la visualización de datos en un LCD de caracteres de 16 columnas por 2 renglones. El mismo puerto puede ser usado para comunicar el instrumento con una computadora personal y con esto la posibilidad de almacenar datos en un determinado intervalo de tiempo.

4. AJUSTE Y CALIBRACIÓN EN TEMPERATURA

El HR-103 se ajustó electrónicamente en dos puntos, 0 °C y 50 °C. El proceso de ajuste a 0 °C consiste en colocar los termómetros en un baño de hielo y variar la resistencia en R₀ (figura 4) hasta que el HR-103 indique una lectura de 0 °C.

Para el ajuste a 50 °C se colocaron los termómetros junto con un termómetro patrón dentro de un baño líquido. En este punto, se ajusta la ganancia de la etapa de amplificación hasta igualar las lecturas de los termómetros y la del instrumento patrón. Generalmente ocurre que al variar la ganancia, se presenta una modificación en el cero de la escala (offset), por ello, es necesario realizar una verificación en este punto y en caso de ser necesario, ajustar nuevamente en 0 °C. Los ajustes se realizan hasta que las diferencias de las lecturas del los termómetros bajo ajuste y el patrón sean mínimas.

La calibración de los termómetros (fig. 5) se realizó en el intervalo de 0 °C a 50 °C, y las fuentes consideradas en la estimación de incertidumbre fueron.

- a) Incertidumbre del termómetro patrón
- b) Incertidumbre del hielo
- c) Incertidumbre del baño de calibración
- d) Incertidumbre por repetibilidad
- e) Incertidumbre por no linealidad
- f) Incertidumbre por resolución.

Las diferencias en temperatura encontradas entre el bulbo seco y el húmedo, son del orden de 0,02 °C (excepto en 50 °C que es de 0,04 °C, ver tabla 1), esta diferencia de 0,2 °C representa un error de 0,2 % HR, por lo cual es importante el utilizar termómetros idénticos.



Fig. 5. Sistema de calibración en temperatura

5. PROPAGACIÓN DE INCERTIDUMBRE

Partiendo de la ecuación 1, la incertidumbre en humedad relativa aplicando el modelo de varianzas relativa se estima con la siguiente expresión.

$$u_{\%HR} = \sqrt{\frac{(u_{e(ts)})^2}{e(t_s)^2} + \frac{(u_{e(td)})^2}{e(t_d)^2}} \cdot \%HR \quad (4)$$

donde:

$$e(t_d) = e^{\sum_{i=1}^4 g_i (t_d)^{i-2}} \quad (5)$$

$$e(t_s) = e^{\sum_{i=1}^4 g_i (t_s)^{i-2}} \quad (6)$$

$$u_{e(ts)} = \frac{\delta e(T_s)}{\delta T_s} \cdot u_{ts} \quad (7)$$

$$= e^{\sum_{i=1}^4 g_i (T_s)^{i-2}} \left[(-g_1 \cdot T_s^{-2}) + (g_3) + (2 \cdot g_4 \cdot T_s) \right] \cdot u_{ts}$$

T_s = temperatura de bulbo seco (Kelvin)

U_{ts} = incertidumbre en la medición de t_s

Para el método psicrométrico se realiza la aproximación (ecuación 8).

$$f = e(t_d) = e(t_h) - A \cdot P \cdot (t_s - t_h) \quad (8)$$

Al aplicar la ley de propagación de incertidumbre a (5) se obtiene:

$$u_{td} [e(t_h), A, P, t_s, t_h] = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial e(t_h)}\right)^2 \cdot u_{e(th)}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial A}\right)^2 \cdot u_A^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial P}\right)^2 \cdot u_P^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \Delta t}\right)^2 \cdot u_{\Delta t}^2} \quad (9)$$

Desarrollando los coeficientes de sensibilidad involucrados en la ecuación 6 se obtiene:

$$u_{td} = \sqrt{\left[-P \cdot (t_s - t_h) \right]^2 \cdot u_A^2 + \left[-A \cdot (t_s - t_h) \right]^2 \cdot u_P^2 + \left[-A \cdot P \right]^2 \cdot u_{\Delta t}^2 + \left[e^{\sum_{i=1}^4 g_i (t_h)^{i-2}} \{ (-g_1 \cdot t_h^{-2}) + (g_3) + (2 \cdot g_4 \cdot t_h) \} \right]^2 \cdot u_{th}^2} \quad (10)$$

Valor indicado por el patrón	Valor indicado por el HR-103 (ts)	Incertidumbre expandida	Valor indicado por el HR-103 (th)	Incertidumbre expandida	Factor de cobertura
(°C)	(°C)	U_e (°C)	(°C)	U_e (°C)	k
0,00	0,00	± 0,02	0,00	± 0,04	2
10,04	10,04	± 0,05	10,03	± 0,06	2
20,06	20,03	± 0,05	20,02	± 0,06	2
29,99	29,97	± 0,05	29,96	± 0,06	2
39,97	39,83	± 0,05	39,84	± 0,06	2
49,15	49,00	± 0,05	48,96	± 0,07	2

Tabla 1 Resultados de calibración en temperatura

Finalmente se sustituyen las ecuaciones 5, 6, 7 y 10 en la ecuación 4 para obtener la incertidumbre expandida.

La tabla 2, presenta los valores sustituyendo los datos de la calibración en temperatura (u_{ts} , u_{th}) y la calibración en humedad (t_s , t_h).

A (K ⁻¹)	t_s (°C)	t_h (°C)	% HR	U (%HR)
0,000667	23,00	8,83	13,1	2,1
0,000670	23,35	12,85	31,9	1,8
0,000674	23,65	17,92	59,7	1,6
0,000677	23,74	22,41	89,9	1,6

Tabla 2. Resultados de la propagación de incertidumbres al modelo matemático

6. VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Para validar los resultados obtenidos de la estimación de incertidumbre en la sección 5, fue necesario realizar una calibración contra un higrometro calibrado de incertidumbres similares.

Para la calibración en humedad relativa, se acondicionó una cámara de flujo dividido con dimensiones de (36 x 36 x 38) cm, ya que durante las primeras pruebas en una cámara de dimensiones menores, se notó que la muestra de aire que sale del sistema mecánico del HR-103 (figura 2), modifica las condiciones de estabilidad de la cámara de prueba, debido a que la muestra lleva consigo un nivel de saturación de vapor de agua.

Los resultados de la calibración en humedad se muestran en la figura 7. Las fuentes de

incertidumbre identificadas se listan a continuación.

- a) Incertidumbre del patrón
- b) Incertidumbre por repetibilidad
- c) Resolución del instrumento
- d) Incertidumbre por no linealidad
- e) Estabilidad de la cámara

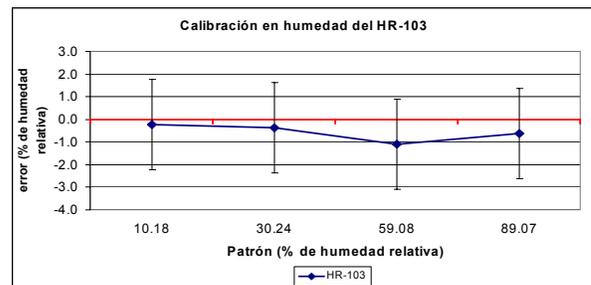


Fig. 6. Resultados calibración en humedad

La incertidumbre estimada en los cuatro puntos de calibración es de ± 2 % HR con un factor de cobertura $k=2$. Los resultados obtenidos en la calibración son consistentes con lo esperado. Para la validación de los resultados prácticos, se aplicó la ley de propagación de incertidumbre al modelo matemático (ecuación 1).

Los resultados obtenidos de la calibración en humedad, son consistentes con los obtenidos al aplicar la ley de propagación de incertidumbre. El caso más crítico se presenta en 10 % HR, donde las diferencias encontradas son del orden de 2 % HR, esto se refleja en la incertidumbre obtenida a partir del modelo matemático.

7. CONCLUSIONES

Se desarrollo un psicrómetro digital con un alcance de medición en humedad relativa de (10 a 90) % HR con una incertidumbre de 2,1 %HR y una resolución de 0,1 % HR.

En temperatura tiene un alcance de operación en temperatura de (0 a 50) °C y una incertidumbre en la medición de $\pm 0,06$ °C.

El sistema digital del instrumento permite visualizar de manera directa el valor de humedad relativa con una resolución de 0,1 % HR, lo que elimina el uso de tablas, adicionalmente, tiene la capacidad mostrar valores de temperatura ambiente y presión atmosférica.

Con la inclusión del transductor de presión, se elimina la necesidad de realizar corrección por presión para hacer determinaciones de humedad relativa.

El uso de termómetros de resistencia de platino en el HR-103, elimina el efecto de histéresis presente en instrumentos comerciales.

Durante el diseño y desarrollo del HR-103 se cuidaron distintos factores que afectan en la medición de humedad, como lo es la estabilidad en la fuente de corriente continua que afecta directamente en la medición de temperatura, se aseguró que el flujo que pasa sobre los termómetros estuviera dentro de las especificaciones para evitar una depresión mayor o menor en el bulbo húmedo.

Los resultados obtenidos fueron validados mediante una calibración con un instrumento de características similares, encontrándose compatibilidad en los resultados.

REFERENCIAS

- [1] Enrique Martines López, Mediciones de Humedad Monografía 1997, publicación CNM-MET-PT-010 CENAM.
- [2] ASTM E 337-84 (Reapproved 1996), Standard Test Method for Measurement Humidity with a Psychrometer (the Measurement of Wet-and Dry- Bulb Temperatures).
- [3] Wolfgang Schmid, Rubén Lazos, Guía Para Estimar la Incertidumbre de la Medición, CENAM, 2000.