

## \*ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE EN LA CALIBRACION DE HIGRÓMETROS CAPACITIVOS

Martines-Lopez, E.<sup>1</sup>, Davila-Pacheco, J.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro Nacional de Metrología, Querétaro, México

**Resumen:** En el laboratorio de humedad del CENAM, aproximadamente el 80 % de los servicios de calibración realizados son higrómetros tipo capacitivos.

La respuesta de estos higrómetros es afectada por distintos factores, entre ellos la electrónica.

Para dar confianza a los usuarios de nuestros servicios de calibración, es conveniente evaluar las principales fuentes de incertidumbre que afectan la calibración de este tipo de higrómetros.

En este artículo se describe la evaluación de los efectos debidos a temperatura, histéresis y no linealidad, los cuales contribuyen mayormente en la incertidumbre de los higrómetros calibrados.

**Palabras clave:** humedad relativa, higrómetros capacitivos, no linealidad, histéresis, incertidumbre.

### 1. INTRODUCCIÓN

En el CENAM se iniciaron los servicios de calibración de higrómetros en el año 2000. En este año se estableció oficialmente el patrón nacional de humedad. Tomando en cuenta que el 80 % de los servicios de calibración realizados en el laboratorio de humedad son higrómetros capacitivos, es necesario identificar y evaluar las principales fuentes de incertidumbre que afectan su calibración.

El principio de operación de este tipo de sensores relaciona su capacitancia eléctrica con la humedad relativa por medio de un circuito electrónico.

En este artículo se describen nuestras experiencias en la evaluación de los efectos de temperatura, histéresis y no linealidad. También se describen algunos métodos para evaluar la histéresis.

### 2. CALIBRACIÓN Y FUENTES DE INCERTIDUMBRE

#### 2.1 Procedimiento de calibración

La calibración de higrómetros se realiza por comparación con el generador de humedad de dos presiones. Los higrómetros bajo calibración se colocan dentro de la cámara

de prueba, tan cercanos entre sí como sea posible (ver figura 1).

Los puntos de calibración se seleccionan en el intervalo de 10 %HR a 95 %HR a una temperatura de prueba que se selecciona en el intervalo de 5 °C a 70 °C.

Las mediciones se realizan en un ciclo completo (en sentido ascendente y luego descendente) de humedad relativa en al menos cuatro puntos de calibración.

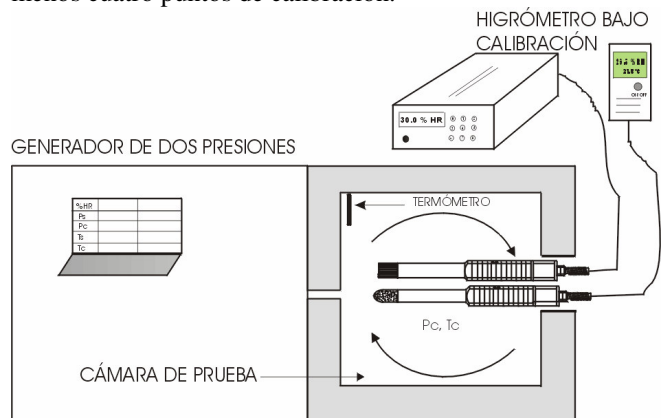


Figura 1- Sistema de calibración de higrómetros

Se ha encontrado que las mayores fuentes de incertidumbre en la calibración de higrómetros capacitivos también incluyen la estabilidad a corto plazo y los gradientes dentro de la cámara (incertidumbre del patrón). Sin embargo, nuestro interés es el aseguramiento de la incertidumbre debido a efectos por temperatura, histéresis y no linealidad.

La incertidumbre de calibración se calcula como una función de la corrección (*Corr*), la cual se obtiene de la diferencia entre el patrón y el higrómetro bajo calibración.

#### 2.2. Efecto por temperatura

La temperatura afecta el comportamiento del sensor, el circuito electrónico y el alambre de conexión[1]. Básicamente, los sensores (materiales dieléctricos), los cuales son fabricados con materiales poliméricos, experimentan cambios en su constante dieléctrica cuando son expuestos a diferentes temperaturas.

Durante la calibración, el instrumento se coloca dentro de la cámara de prueba, donde el sensor, el circuito electrónico y parte de los cables que lo conforman se colocan en la zona

de calibración. De esta forma no es posible evaluar sus efectos de manera independiente.

Para evaluar este efecto es necesario exponer el higrómetro a diferentes temperaturas manteniendo la humedad relativa constante. De los datos obtenidos, se puede calcular el coeficiente de temperatura correspondiente.

**2.3 Histéresis**

El efecto de histéresis depende de la absorción, desorción y temperatura del vapor de agua sobre la superficie del sensor. Generalmente este efecto es más significativo cuando el sensor se expone repentinamente de altas a bajas concentraciones de humedad relativa.

Para medir este efecto, Beyon *et al* recomiendan realizar al menos dos ciclos completos de mediciones [2].

En la figura 2 se muestra una curva típica de histéresis. Para generar esta curva se realizaron mediciones en 10 %HR, 30 %HR, 60 %HR y 90 %HR en sentido ascendente inicialmente y posteriormente en sentido descendente.

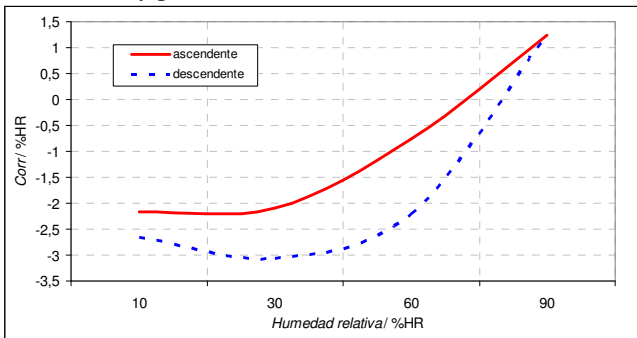


Figure 2- Curva típica de histéresis de un higrómetro capacitivo.

La contribución de incertidumbre debida a este efecto se calcula de la diferencia entre la lectura en sentido ascendente y la lectura en sentido descendente y suponiendo una distribución de probabilidad uniforme.

**2.4 No linealidad**

El comportamiento entre la capacitancia eléctrica y la humedad relativa para un higrómetro capacitivo es aproximadamente lineal como se muestra en la figura 3.

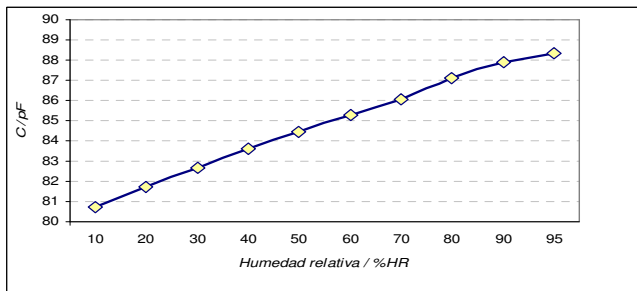


Figura 3- Relación entre la humedad relativa y la capacitancia eléctrica de un sensor de humedad. Las mediciones de capacitancia se realizaron a una frecuencia de 100 kHz en intervalos de 10 %HR.

Los puntos experimentales se pueden aproximar por una línea recta tal como la siguiente ecuación:

$$C = m \cdot (HR) + b, \tag{1}$$

Donde, *C* es la capacitancia como función de *HR*, *m* y *b* son los parámetros que se pueden obtener del ajuste de datos.

Los valores de capacitancia se pueden convertir, por medio de un circuito electrónico, a valores de *HR*.

De esta forma, los resultados de calibración se pueden expresar como:

$$Corr = m' (HR) + b', \tag{2}$$

donde, *Corr* es la corrección de la calibración, *m'* y *b'* son parámetros calculados de los datos experimentales, *HR* es el valor de humedad relativa del higrómetro bajo calibración.

La incertidumbre por la no linealidad se calcula de la ley de propagación de incertidumbre aplicada a la ecuación (2) [3].

**3. ANALISIS DE INCERTIDUMBRE**

**3.1 Temperatura**

En una forma general, la evaluación de la incertidumbre por el efecto de temperatura se puede obtener realizando mediciones en al menos dos valores de temperatura a la misma condición de *HR*. Algunas veces, el coeficiente de temperatura lo provee el fabricante.

En CENAM, se evaluó en varios sensores, los cuales fueron expuestos a temperaturas desde 20 °C a 50 °C a un valor de 60 %HR. Los coeficientes de temperatura, en cada sensor se calcularon de los cambios en la corrección (*Corr*, *HR*) debidos a cambios de temperatura.

La figura 4 muestra el comportamiento típico de higrómetros capacitivos (E1, E2, E3) cuando son expuestos a diferentes temperaturas. En esta figura se puede ver que algunos sensores muestran una reducción en el valor de la corrección cuando aumenta la temperatura (coeficiente de temperatura negativo), otros muestran una respuesta cuadrática con la temperatura (coeficiente de temperatura cuadrático)

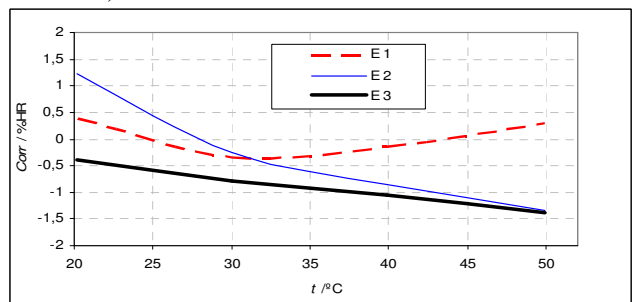


Figure 4- Coeficientes de temperatura en higrómetros capacitivos (E1, E2, E3). Los valores de los coeficiente se calcularon como una función de la corrección (*Corr*).

\* Esta es una traducción libre del artículo original (sin revisión) en inglés que fue enviado para su publicación en el *5th International Symposium on Humidity and Moisture, ISHM 2006*. En consecuencia no puede ser citado como tal, sino como comunicación personal o privada con uno de sus autores

De los datos obtenidos, se encontró que los coeficientes de temperatura varían desde  $-0,15 \%HR\ ^\circ C^{-1}$  a  $0,08 \%HR\ ^\circ C^{-1}$  en el intervalo de  $20\ ^\circ C$  a  $50\ ^\circ C$ .

**3.2 Histéresis**

Varios sensores de distintos fabricantes se usaron para evaluar el efecto de histéresis. En la figura 5 se muestran las curvas de calibración de los higrómetros (H1, H2, H3, H4, H5), los cuales muestran un efecto por histéresis. Las curvas de calibración mostradas se obtuvieron a una temperatura de  $22\ ^\circ C$ .

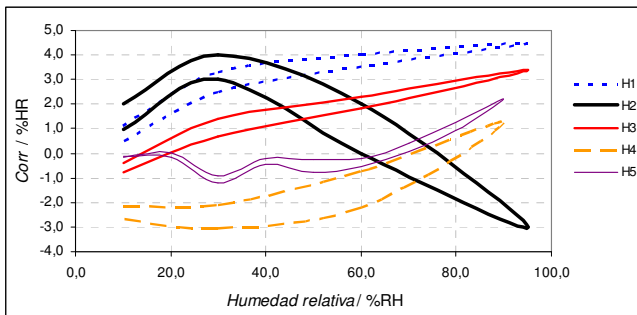


Figura 5- Curvas de calibración en secuencias ascendente y descendente (efecto de histéresis). Las mediciones se realizaron con un generador de humedad.

Para seleccionar el método para evaluar este efecto se realizaron un conjunto de pruebas. De ellas se seleccionó una, en base al compromiso entre el tiempo y costo de las mediciones en el servicio de calibración.

- a) El sensor se expuso a un ciclo completo de mediciones en el intervalo de 10 %HR a 90 %HR. Los puntos de prueba fueron 10 %HR, 30 %HR, 60 %HR y 90 % HR en ambas secuencias (ascendente y descendente).
- b) Se realizaron cinco ciclos completos de mediciones en sentido ascendente y descendente en los mismos puntos que a).
- c) Las mediciones se realizaron en las siguientes secuencias: 10 %HR, 60 %HR, 90 %HR, 70 %HR, 30 %HR y 10 %HR.
- d) Las mediciones se realizaron en las siguientes secuencias: 10 %HR, 90 %HR, 10 %HR, 90 %HR, y 60 %HR.

En la tabla1 se muestran los valores de incertidumbre obtenidos en las pruebas antes mencionadas. Todas las pruebas se realizaron a una temperatura de  $22\ ^\circ C$ .

Los resultados obtenidos muestran que la máxima desviación entre las pruebas realizadas es  $0,3\ \%HR$ .

No obstante que la prueba b) es recomendable para evaluar el efecto de histéresis de una manera efectiva, esta prueba requiere largos periodos de tiempo en la calibración.

Prueba %HR	Incertidumbre en %HR, debida al efecto de histéresis			
	a)	b)	c)	d)
10	0,3	0,4	0,6	0,3
30	0,6	0,8	0,5	
60	0,8	0,8	0,5	0,7
70	----	----	0,5	----
90	0	0	0	0

Tabla 1- Comparación de técnicas para evaluar el efecto de histéresis. La contribución en la incertidumbre fue calculada como está descrito en 2.3.

Las pruebas restantes requieren aproximadamente el mismo tiempo de calibración. Debido a que los datos disponibles de la prueba a) eran mayores que para las otras pruebas, en el laboratorio de humedad se eligió esta prueba para evaluar el efecto de histéresis. Además, en la realización de los experimentos se encontraron resultados reproducibles.

De nuestras experiencias en el laboratorio de calibración, hemos encontrado que los valores de incertidumbre debido al efecto de histéresis varían desde  $0,3\ \%HR$  a  $1,3\ \%HR$ . Estos resultados son similares a los reportados por Uusipaikka *et al* [4] quienes reportaron valores entre  $0,5\ \%HR$  y  $1,0\ \%HR$ .

**3.4 No linealidad**

La figura 6 muestra las curvas de calibración para nueve sensores tipo capacitivos (S1...S9). En estas curvas se esperaba un comportamiento aproximadamente lineal como lo sugería la figura 3. Las desviaciones de este comportamiento pueden ser debidos al acondicionamiento electrónico, al envejecimiento del sensor, a la contaminación, entre otros.

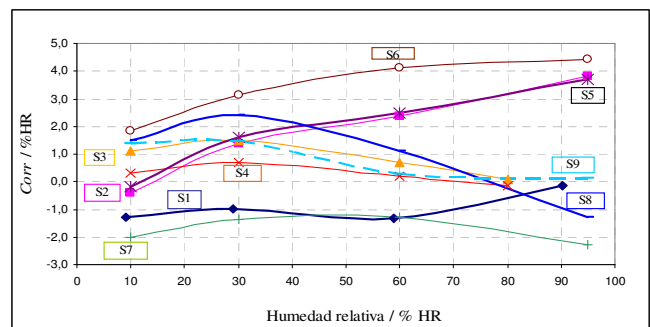


Figure 6- Curvas de calibración para nueve sensores capacitivos medidos en el intervalo de 10 %HR a 95 %HR.

Cuando no es posible calibrar un higrómetro en muchos puntos (mas de cuatro), es conveniente generar una curva de calibración basado en una línea recta. Generalmente en CENAM calibramos los higrómetros en cuatro puntos y usamos una línea recta como curva de calibración.

Como se mencionó en 2.4, los parámetros de la curva de calibración se calculan por el método de mínimos cuadrados, y su incertidumbre ( $u_{min}$ ) se obtiene de la Guía ISO GUM.

\* Esta es una traducción libre del artículo original (sin revisión) en inglés que fue enviado para su publicación en el *5th International Symposium on Humidity and Moisture, ISHM 2006*. En consecuencia no puede ser citado como tal, sino como comunicación personal o privada con uno de sus autores

La propagación de la incertidumbre de la ecuación (2) es la incertidumbre de la no linealidad de la corrección, la cual es la siguiente:

$$u_{nlin}(Corr) = \sqrt{u_{b'}^2 + (RH)^2 u_{m'}^2 + 2(RH) \cdot u_{b'} \cdot u_{m'} \cdot r(m', b')} \quad (3)$$

donde,

$u_{b'}$  es la incertidumbre debida a la estimación de  $b'$ ,  
 $u_{m'}$  es la incertidumbre debida a la estimación de  $m'$ ,  
 $r(m', b')$  es el coeficiente de correlación entre  $m'$  y  $b'$ .

$u_{b'}$ ,  $u_{m'}$ , y  $r(m', b')$  se calculan como se describe en [4].

La ecuación (3) fue usada para evaluar  $u_{nlin}$  en las curvas de calibración mostradas en la figura 6.

En la figura 7 se muestran los resultados obtenidos para el higrómetro S9. En este caso, la corrección de calibración ( $Corr$ ) se encuentra dentro de los límites de  $U_{nlin}$ . Esto confirma que la ecuación (3) es adecuada para este propósito.

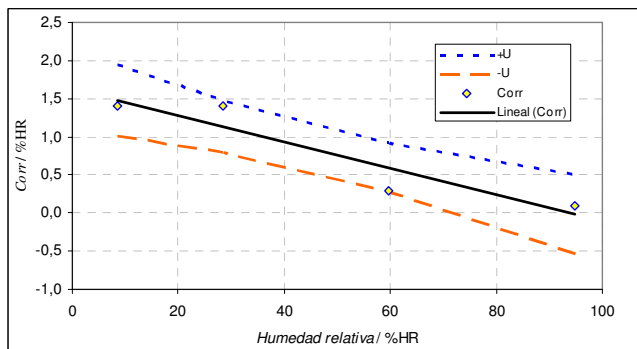


Figura 7- Incertidumbre por no linealidad en el sensor S9.

En el sensor S9 el factor de correlación fue de  $r(m', b') = -0,83$  y la incertidumbre por la no linealidad es menor a es  $0,5\%$  HR, para  $k=2$ .

Para los otros sensores se encontró que  $U_{nlin}$  varía desde  $0,2\%$  a  $1,0\%$  HR. En la referencia [5], se reportaron resultados similares.

Finalmente, para evaluar la incertidumbre en curvas de calibración de orden mayor, se realizó el ajuste por mínimos cuadrados para curvas cuadráticas y cúbicas con cinco o más puntos de calibración. En algunos casos se encontró que la incertidumbre se reduce hasta en  $30\%$  del valor original. Si bien esta incertidumbre se reduce, esto requiere de mayores tiempos de calibración, lo cual en algunos casos incrementa el costo de la calibración.

#### 4. CONCLUSION

En este artículo se describe la evaluación de la incertidumbre debida a efectos de temperatura, histéresis y no linealidad de higrómetros capacitivos.

En la evaluación del efecto por temperatura, se encontró que los coeficientes de temperatura tienen valores que van desde  $-0,15\%$ HR  $^{\circ}\text{C}^{-1}$  a  $0,08\%$ HR  $^{\circ}\text{C}^{-1}$  en un intervalo de temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$  a  $50^{\circ}\text{C}$ .

Se presentaron cuatro pruebas para evaluar el efecto de histéresis, de los cuales se eligió una de ellos. Se encontró que su contribución a la incertidumbre va desde  $0,3\%$ HR a  $1,3\%$ HR.

Cuando no se pueden usar muchos puntos para calibrar un higrómetro, lo más conveniente es realizar el ajuste de los resultados a una línea recta. En este caso es necesario evaluar la incertidumbre correspondiente del ajuste. Se encontró que la incertidumbre por este efecto va desde  $0,2\%$ HR a  $1,0\%$ HR. Además, si se realiza el ajuste a una curva de mayor orden (cuadrática o cúbica), la incertidumbre se puede reducir hasta en  $30\%$  de su valor, sin embargo el costo y el tiempo de calibración se incrementa considerablemente.

#### REFERENCIAS

- [1] Lafarie, J.P., 1985, "Relative humidity measurement: A review of two state-of-the art sensors", *2<sup>nd</sup> International Symposium and humidity and moisture*, pp. 875-889.
- [2] Beyon R., Lovell-Smith J., Mason R. and Vicente T., 2002, "State-of- art calibration of relative humidity sensors", *Proceedings of Tempmeko 2001*, pp. 1003-1008.
- [3] ISO GUM, 1995 "Guide to expression of the uncertainty in Measurement". BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAP, IUPAC, OIML.
- [4] Bevington, R., Robinson K., 1992, "Data reduction and error analysis for the physical sciences", 2<sup>nd</sup> edition, McGraw-Hill.
- [5] Uusipaikka, L., Heinonen, M., 2004, "Performance of capacitive relative humidity sensors", *Proceedings of Tempmeko 2004*, pp. 971-976.

#### Autores

Enrique Martines López, Laboratorio de Humedad, Centro Nacional de Metrología, – CENAM, Km 4,5 Carretera a Los Cués, El Marqués, Querétaro, Mexico. Phone: + 52 442-2110500, ext. 3420, Fax: + 52 442-2110548, e-mail: [emartine@cenam.mx](mailto:emartine@cenam.mx).

Jesus A. Dávila Pacheco, Laboratorio de Humedad, Centro Nacional de Metrología, – CENAM, Km 4,5 Carretera a Los Cués, El Marqués, Querétaro, Mexico. Phone: + 52 442-2110500, ext. 3395, Fax: + 52 442-2110548, e-mail: [jdavila@cenam.mx](mailto:jdavila@cenam.mx).