

# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE HUMEDAD POR FLUJO DIVIDIDO

Dávila P. Jesús<sup>1</sup>, Juárez C. Nadia<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro Nacional de Metrología (CENAM),

km 4.5 Carretera a Los Cués, El Marqués, Qro. C. P. 76246, +52 442 2110500 ext. 3395, [jdavila@cenam.mx](mailto:jdavila@cenam.mx)

<sup>2</sup>Universidad Politécnica de Querétaro Carretera Estatal 420 s/n El Rosario, C. P. 76240

El Marqués, Querétaro, México, [aidanmjc@hotmail.com](mailto:aidanmjc@hotmail.com)

**Resumen.** Los sistemas de generación de humedad se usan en procesos donde se requieren condiciones controladas de humedad tales como preparación de muestras y sistemas de calibración. En los sistemas de calibración existen diferentes métodos de generación de humedad, dentro de los cuales está el generador de humedad por flujo dividido. El generador de humedad por flujo dividido opera al mezclar, proporcionalmente, un flujo de aire seco y otro saturado con vapor de agua, de esta manera es posible generar atmosferas con humedad controlada. En este trabajo se presentan los principios de operación, el diseño, construcción y pruebas de desempeño de un generador de humedad por flujo dividido para la calibración de higrómetros de mediana exactitud.

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente el Centro Nacional de Metrología (CENAM) cuenta con un sistema de generación de humedad por dos presiones tipo comercial el cuál es el Patrón Nacional de Humedad, sin embargo, debido creciente demanda de calibración de medidores de humedad, surgió la necesidad de contar con un sistema de generación de humedad para calibración de medidores de mediana exactitud.

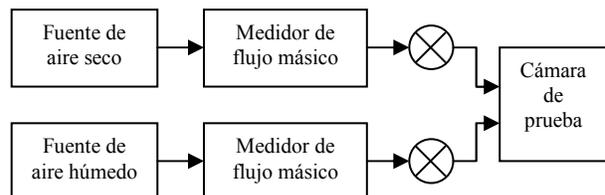
Existen diferentes métodos de generación de humedad, los cuales se pueden catalogar en primarios y secundarios. Dentro de los primarios están el método de dos temperaturas y el de dos presiones. Dentro de los secundarios se tienen el generador de flujo dividido y las soluciones de sales.

El generador de humedad por flujo dividido tiene la ventaja sobre el de soluciones de sales porque es un sistema de operación sencilla y provee un ambiente más limpio y seguro para los sensores que se colocan dentro de la cámara de prueba. La principal desventaja es el costo de mantenimiento.

En el laboratorio de humedad del Centro Nacional de Metrología, se diseñó y construyó un generador de humedad por flujo dividido. En este trabajo se presentan los principios de operación, consideraciones en el diseño y construcción del generador y se presentan resultados de las pruebas de su desempeño.

## 2. TEORIA DE OPERACIÓN

Un generador de humedad por flujo dividido consta de una fuente de aire seco, una fuente de vapor de agua, un control de flujo y una cámara de prueba. En la figura 1 se muestra el esquema de un generador por flujo dividido.



**Figura 1.** Esquema de un generador de humedad por flujo dividido.

El principio de operación de un generador por flujo dividido es mezclar un flujo de aire saturado de vapor de agua de manera proporcional con un flujo de aire seco. La ecuación 1 describe la humedad relativa en un generador de flujo dividido [1].

$$\%HR = \frac{f_s \cdot e(t) + f_h \cdot e(t_s)}{(f_s + f_h) \cdot e(t_s)} \times 100 \quad (1)$$

Donde  $f_s$  es el caudal de aire seco;  $f_h$  es el caudal del aire húmedo;  $e(t)$  es la presión parcial de vapor de agua en el aire seco;  $e(t_s)$  es la presión de saturación de vapor de agua.

La presión parcial de vapor de agua en el aire seco y la presión de saturación de vapor de agua se pueden calcular con:

$$e(T) = \exp\left(\sum_{i=0}^6 a_i \cdot T^{i-2} + a_7 \cdot \ln T\right) \quad (2)$$

Donde  $T$  es la temperatura de punto de escarcha o rocío en el aire seco o en el saturador;  $a_i$  son constantes propuestas por Hardy (1998) [3].

Si se considera que la masa de vapor de agua en la rama seca es 0, por lo tanto la presión parcial de vapor de agua es 0. Así se tiene:

$$\%HR \approx \frac{f_h}{(f_s+f_h)} \times 100 \quad (3)$$

### 3. DISEÑO DEL GENERADOR DE HUMEDAD POR FLUJO DIVIDIDO

#### 3.1 Sistema de secado

Se consideraron dos opciones como sistema de secado, en el desarrollo de este trabajo.

En la primera opción una bomba de diafragma funcionó como fuente de aire y se usó una columna de desecante, sulfato de calcio (drierita). Con este sistema es posible obtener aire con una temperatura de punto de escarcha  $t_f$  de aproximadamente  $-40^\circ\text{C}$ , que equivale aproximadamente a  $0.1 \text{ g} / \text{m}^3$  de vapor de agua.

La segunda opción se usó un cilindro de aire extra seco como fuente de aire seco. La temperatura de punto de escarcha en este tipo de aire es de aproximadamente  $-70^\circ\text{C}$ , que equivale a  $0.002 \text{ g} / \text{m}^3$  aproximadamente.

En la figura 2 se muestra el efecto en la generación de humedad relativa a diferentes valores de  $t_f$  en el aire seco.

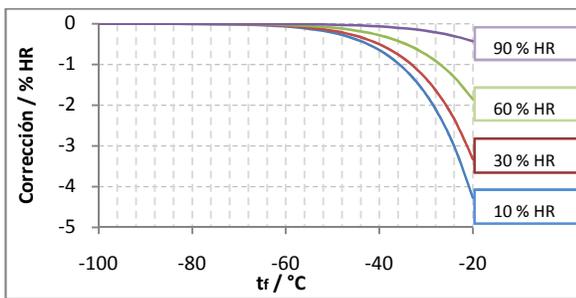


Figura 2. Efecto del aire seco en la determinación de humedad relativa.

#### 3.2 Sistema de saturación de vapor de agua

Existen diferentes sistemas de saturación de vapor de agua, entre los cuales se pueden mencionar el método de burbujeo y el ultrasónico, que se usan si el sistema de saturación está a temperatura mayor que  $0^\circ\text{C}$ . En este trabajo se realizó la saturación de vapor de agua por burbujeo.

En el saturador de por burbujeo, se inyecta un flujo constante de aire a través de un aspersor de aire por la parte inferior de un contenedor con agua desionizada. Durante la trayectoria de la burbuja dentro del líquido, ésta se humidifica hasta saturarse aproximadamente al 100 % de vapor de agua.

El sistema de saturación de vapor de agua se forma con un cilindro de acrílico, de 29 cm de altura y 6.3 cm de diámetro interno, colocado verticalmente, que en su interior tiene un difusor de aire comercial colocado a 3 cm de la base (figura 3).



Figura 3. Saturador de vapor de agua por burbujeo.

La saturación depende del flujo, la presión, la temperatura en el saturador y la longitud de la columna de agua [2].

En este trabajo las condiciones de flujo, presión y temperatura tuvieron valores constantes y se varió la longitud de la columna de agua.

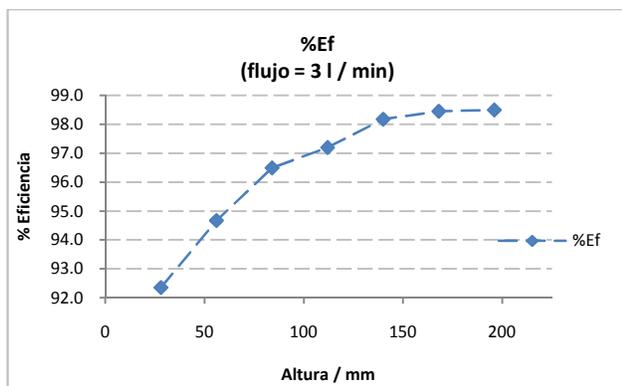
Para obtener el valor de saturación, se mantuvo un flujo constante de 3 L/min de aire seco, a 23 °C. Sobre la superficie del líquido se midió la temperatura  $t$  y la temperatura de punto de rocío  $t_d$  de la muestra saturada.

El valor de saturación de vapor de agua se determinó con:

$$\%Ef \approx \%HR \approx \frac{e(t_d)}{e(t)} \times 100, \text{ donde} \quad (4)$$

$e(t)$  es la presión de saturación de vapor de agua a temperatura de la muestra;  $e(t_d)$  es la presión parcial de vapor de agua a la temperatura de punto de rocío de la muestra de aire saturado;  $e(t)$  y  $e(t_d)$  se calcularon con la ecuación 2 a partir de las mediciones de  $t$  y  $t_d$ .

Se determinó el valor de saturación de vapor de agua a diferentes valores de altura de columna de agua, hasta lograr una eficiencia de al menos 98 %; a mayor altura, mayor grado de saturación. En la figura 4 se muestran los resultados.



**Figura 4.** Eficiencia de saturación contra la altura de columna de agua.

La incertidumbre en la determinación de los valores de eficiencia es de 0.44 % con  $k=1$ .

### 3.3 Sistema de medición y control de flujo

El sistema de control de flujo se realizó con válvulas de acero inoxidable con micro regulación. Para generar el valor de humedad relativa deseado, se requiere fijar un valor de flujo, seco ó húmedo, y calcular y ajustar su complemento.

### 3.4 Cámara de prueba

La cámara de prueba ó cámara de calibración del generador de humedad por flujo dividido se construyó con acrílico. Las dimensiones son 20 cm X 20 cm X 30 cm (figura 5). El tamaño de la cámara se consideró de acuerdo a las dimensiones y cantidad de higrómetros que se calibran a la vez.



**Figura 5.** Cámara de prueba del generador de humedad por flujo dividido.

Se instaló, un ventilador en la parte inferior de la cámara de calibración el cuál funciona como sistema de agitación.

Este sistema de agitación disipa calor dentro de la cámara de calibración mientras opera, por lo que se tiene un gradiente de temperatura de aproximadamente 0.8 °C entre el sistema de saturación y la cámara. Este gradiente de temperatura afecta al valor de humedad relativa a generar.

Para estimar el error debido a este gradiente, se considera la ecuación 4, donde se conoce que  $e(t)$  es la presión de saturación de vapor de agua a temperatura de la muestra, en este caso la temperatura en el saturador  $t_s$ . Si ésta muestra se lleva a la cámara de prueba y se asume que no hay pérdida de masa de vapor de agua ( $e(t_d)$  se mantiene constante), al incrementar la temperatura de la muestra a la temperatura de la cámara  $t_c$ , se

incrementa la presión de saturación de vapor de agua, por lo tanto %HR disminuye.

Cuando solo se tiene flujo de vapor de agua hacia la cámara de prueba, un gradiente entre el saturador y la cámara de calibración de 0.8 °C, origina un error de aproximadamente 5 % de humedad relativa.

#### 4. PRUEBAS Y RESULTADOS

##### 4.1 Caracterización de cámara de prueba.

Se realizó un estudio de estabilidad y gradientes en la cámara de calibración a diferentes valores de humedad relativa.

En la tabla 1 se muestran un conjunto de valores de flujo húmedo y seco para obtener los puntos de prueba en humedad relativa. Esto valores se calcularon a partir de la ecuación 1, donde se consideró el uso de aire extraseco y la medición de temperatura de punto de rocío en el saturador.

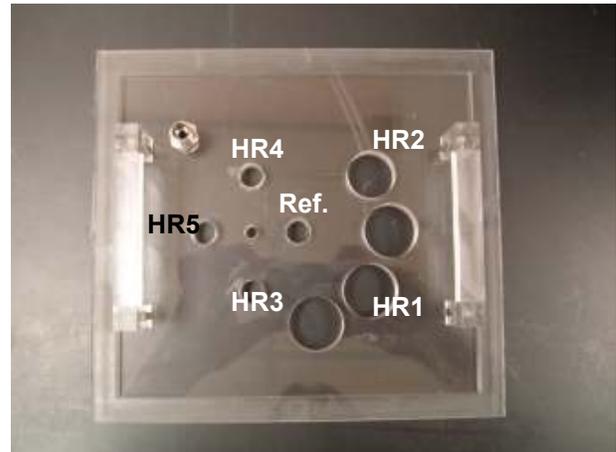
**Tabla 1.** Cálculo de humedad relativa a partir de flujo de aire seco y vapor de agua.

%HR	fh / L/min	fs / L/min
90.9	2	0.2
60.0	1.5	1
30.0	0.9	2.1
10.0	0.3	2.7

La medición de flujo se realizó con un medidor de flujo másico. Para controlar la humedad relativa dentro de la cámara de prueba, primero se fijó el flujo de aire seco y después, el flujo de vapor de agua hasta alcanzar los valores descritos en la tabla 1.

La caracterización de estabilidad y perfiles de humedad relativa dentro de la cámara de calibración se realizó con cinco higrómetros tipo capacitivo con una incertidumbre de 0.6 % a 1.7 % en el alcance de medición de 10 % a 90 %.

Las mediciones se realizaron en un plano horizontal ubicado a 12 cm por debajo de la tapa superior de la cámara. En la figura 6 se muestra la posición aproximada de los sensores en el plano horizontal y su identificación; HR1 a HR5 corresponde a los sensores testigo y Ref. al medidor de referencia. Se consideró que la posición de los sensores cubre el volumen de trabajo de la cámara.



**Figura 6.** Posición aproximada de los sensores para la caracterización de estabilidad y perfiles de humedad relativa en la cámara de calibración.

Se midió en valores nominales de 10 %, 30 %, 40 %, 60 % y 90 % de humedad relativa. En la tabla 2 se muestran los resultados de las mediciones realizadas en cada punto.

**Tabla 2.** Resultado de las mediciones en humedad en cada posición aproximada.

Pruebal %HR	HR1 / %HR	HR2 / %HR	HR3 / %HR	HR4 / %HR	HR5 / %HR	HR <sub>Ref</sub> / %HR
10	9.1	9.3	9.2	9.1	9.1	<b>9.3</b>
30	29.5	29.4	29.7	29.6	29.7	<b>29.2</b>
40	38.6	38.6	39.8	39.4	38.9	<b>38.9</b>
60	60.7	61.4	61.4	60.9	61.3	<b>60.6</b>
90	89.9	89.1	89.9	89.3	89.9	<b>89.1</b>

El valor de referencia en humedad relativa se obtuvo con un medidor de temperatura de punto de rocío por espejo frío y un termómetro de resistencia de platino.

En la tabla 3 se muestran los valores de incertidumbre en el cálculo de humedad relativa de referencia a partir de mediciones de temperatura de punto de rocío y temperatura [4]. La incertidumbre combinada en la medición de punto de rocío es de 0.1 °C y de 0.05 °C en la temperatura de la cámara.

**Tabla 3. Incertidumbre en la determinación del valor de humedad relativa de referencia con  $k=2$ .**

Valores medidos		Valores calculados	
$t / ^\circ\text{C}$	$td / ^\circ\text{C}$	%HR	$U_e / \%HR$
22.12	-11.89	9.3	<b>0.1</b>
22.29	3.5	29.2	<b>0.3</b>
22.47	7.79	38.9	<b>0.4</b>
22.37	14.39	60.6	<b>0.6</b>
22.49	20.6	89.1	<b>0.9</b>

**4.2 Incertidumbre en la cámara de calibración por estabilidad y gradientes de humedad relativa**

Las componentes de incertidumbre del sistema de generación de humedad incluyen su incertidumbre por estabilidad y gradientes en la cámara de calibración.

La estabilidad en cada punto se determinó con la desviación estándar de las mediciones en cada punto.

La incertidumbre por estabilidad en la cámara de calibración se consideró como el punto más inestable en la cámara en cada punto de prueba.

Las mediciones se realizaron en intervalos de tiempo de al menos 30 minutos a una temperatura de  $22.2\text{ }^\circ\text{C} \pm 0.6\text{ }^\circ\text{C}$ .

En la tabla 4 se muestran los valores de estabilidad para cada punto de prueba en cada sensor.

**Tabla 4. Estabilidad en humedad relativa dentro de la cámara de prueba.**

Prueba / %HR	HR1 / %HR	HR2 / %HR	HR3 / %HR	HR4 / %HR	HR5 / %HR	HR <sub>Ref</sub> / %HR
10	0.03	<b>0.031</b>	0.027	0.030	0.028	0.028
30	0.049	<b>0.057</b>	0.050	0.045	0.052	0.046
40	0.042	0.037	0.030	0.029	<b>0.044</b>	0.036
60	0.039	0.043	<b>0.083</b>	0.035	0.052	0.070
90	0.068	<b>0.071</b>	0.049	0.040	0.044	0.052

Los gradientes de humedad relativa se calcularon con la ecuación 5.

$$grad = |HR_{ref} - HR_n| \tag{5}$$

Donde  $HR_{ref}$  es el valor de humedad relativa de referencia obtenido con el medidor de temperatura de punto de rocío;  $HR_n$  es el valor de humedad relativa medido por cada sensor.

En la tabla 5 se muestran los valores de los gradientes en cada punto de prueba y en cada posición descrita en la figura 6.

**Tabla 5. Gradientes en humedad relativa dentro de la cámara de prueba.**

Prueba / %HR	HR1 / %HR	HR2 / %HR	HR3 / %HR	HR4 / %HR	HR5 / %HR	HR <sub>Ref</sub> / %HR
10	0.2	0	0.1	0.2	<b>0.2</b>	9.3
30	0.3	0.2	<b>0.5</b>	0.4	0.5	29.2
40	0.3	0.3	<b>1</b>	0.5	0	38.9
60	0.1	0.8	<b>0.7</b>	0.3	0.7	60.6
90	0.8	0	0.8	0.2	<b>0.8</b>	89.1

La incertidumbre por gradientes dentro de la cámara se calculó al considerar una distribución rectangular al mayor gradiente en cada punto de prueba.

Finalmente en la tabla 6 se muestran los valores de incertidumbre por estabilidad, gradientes y el valor de la incertidumbre combinada.

**Tabla 6. Incertidumbre por estabilidad y gradientes en la cámara de calibración.**

Prueba / %HR	$u_{est} / \%HR$	$u_{grad} / \%HR$	$u_{camara} / \%HR$
10	0.03	0.06	<b>0.07</b>
30	0.06	0.14	<b>0.15</b>
40	0.04	0.29	<b>0.29</b>
60	0.08	0.2	<b>0.22</b>
90	0.07	0.23	<b>0.24</b>

La incertidumbre del sistema de calibración estará dada por la combinación de la incertidumbre del valor de referencia y la incertidumbre combinada de las componentes que aparecen en la tabla 6.

## 5. CONCLUSIONES.

Se diseñó y construyó un sistema de generación de humedad por flujo dividido el cuál opera en el alcance de 10 % a 90 %.

El sistema usa un saturador de columna de agua y se puede obtener una eficiencia de hasta 98 %.

De acuerdo a lo anterior, sería factible generar atmósferas con humedad relativa de 98 %, sin embargo, al agregar un sistema de agitación dentro de la cámara de prueba, se tiene una fuente de calor, por lo que se generó un gradiente de temperatura entre el saturador de vapor de agua y la cámara de prueba de aproximadamente 0.8 °C. Este gradiente de temperatura genera una diferencia de hasta 5 % HR cuando se intenta generar 95 %HR.

La estabilidad de la humedad relativa dentro de la cámara es mejor a 0.08 % HR. La incertidumbre por gradientes es menor a 0.27 % HR.

La incertidumbre combinada del sistema de generación es menor a 0.28 %HR con  $k=1$ . La mayor contribución la tiene la incertidumbre por gradientes.

Con los datos obtenidos hasta el momento no es posible determinar si los gradientes son debidos a la distribución del vapor de agua dentro de la cámara ó a gradientes de temperatura.

## 6. REFERENCIAS.

- [1] C. W. Meyer, "Design and performance of the new NIST hybrid humidity generator", NCSLI 2008 Workshop and Symposium
- [2] Bruce Mayer, "Transient analysis of carrier gas saturation in liquid source vapor generators", 2001 American Vacuum Society.
- [3] Bob Hardy, "ITS-90 Formulations for vapor pressure, frostpoint temperature, dewpoint temperature and enhancement factors in the range -100 °C to +100 °C", Third International Symposium of Humidity and Moisture; 1, pp.214-222.
- [4] Jesús Dávila, Enrique Martines, "Propagación de incertidumbre en la conversión de algunas magnitudes de humedad", Simposio de Metrología 2006.

- [5] ISO GUM, "Guide to expression of the uncertainty in Measurement". BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAP, IUPAC, OIML, 1993.