



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE ELECTRONICA

Automatización Industrial:
Sensores De Humedad

Profesor : Jaime Glaría
Alumno : Samir Kouro
9721003-9
Fecha : 01 – 06 – 2001

Introducción:

La humedad es un fenómeno natural, que se presenta a nivel molecular y se encuentra básicamente relacionada con la cantidad de moléculas de agua presentes en una determinada sustancia, la cual puede estar en estado sólido o gaseoso.

Si bien el grado de concentración de agua en el ambiente, no influye mayormente sobre la vida normal de un ser humano (salvo en el confort), sabemos que sí resulta relevante para ciertos procesos, ya sean químicos, físicos o biológicos. Por ello, los científicos se han visto involucrados en el tema, dada la necesidad de desarrollar un conocimiento sustancial del fenómeno, con el fin de incorporarlo y relacionarlo con los procesos pertinentes, y de esa manera obtener cierto beneficio de ello.

Con el pasar de los años, los procesos industriales han experimentado una continua modernización, la calidad y cantidad de tecnología involucrada ha ido en aumento, y se logran cada vez sistemas más óptimos y rentables. La automatización ha jugado un rol muy importante en esto último, abarcando cada vez más áreas de la ingeniería, que no siempre son cercanas a la electrónica. El presente documento, justamente pretende ser un aporte introductorio y de referencia, para aquellos procesos que involucren conceptos y variables relativos a la humedad, con la finalidad de estudiar las ideas necesarias para enfrentar problemas de este tipo.

Objetivos:

- Entender los conceptos y propiedades más importantes relacionadas con la humedad.
- Identificar variables, parámetros y relaciones matemáticas, que modelen el fenómeno.
- Estudiar el principio de funcionamiento de algunos sensores de humedad.
- Conocer formas de calibración y mantención de sensores de humedad.
- Establecer usos y aplicaciones de los sensores en la actualidad.

Definiciones y conceptos:

Antes de estudiar los distintos tipos de sensores de humedad existentes en la actualidad, conviene definir y aclarar algunos conceptos, cuyos significados pueden estar desorientados, en vista que existen acepciones populares que distan del significado científico real. Por ello a continuación se entrega una lista con la terminología que será empleada en el presente documento.

Higrometría o Psicrometría:

Se refiere al estudio y medición de la cantidad de agua presente en una mezcla de sustancias, ya sea sólida o gaseosa (generalmente el aire).

Higrómetro o Psicrómetro:

Dispositivo capaz de medir la humedad.

Saturación de un gas:

Se dice que un gas se encuentra saturado, cuando éste no es capaz de soportar más vapor de agua a una temperatura y presión absoluta dada. Cuando el gas está en saturación, la cantidad de agua que se evapora es igual a la cantidad de agua que se condensa, por ello hay textos que prefieren referirse a equilibrio en lugar de saturación.

Humedad absoluta (H_{abs}):

Es la razón entre la masa de agua presente en la mezcla (en [Kg]), y el volumen (en [m³]) de la misma (aire, tierra, etc.).

Humedad específica:

Es la razón entre la masa de agua y la masa de sustancia seca presentes en la mezcla ([Kg agua]/[Kg Sustancia seca]).

Presión parcial de vapor (P_v):

Es la fracción de presión ambiental debido a la presencia de vapor de agua en el aire, se mide en [Pascal] lo que equivale a [N/m²].

Presión de vapor de saturación (P_{sat}):

Es la máxima presión de vapor que un gas puede soportar, a una cierta temperatura y presión atmosférica, a partir de la cual el vapor se comienza a condensar (cambia a estado líquido), se mide en [Pa].

Humedad relativa (H_r):

Es la razón entre la presión parcial de vapor actual, y la presión de vapor de saturación, expresada generalmente en porcentaje. O de otra manera, es la cantidad de agua que contiene un gas expresada en tanto por ciento de la cantidad que el gas tendría en estado de saturación, a la misma temperatura y presión absoluta:

$$H_r = \frac{P_v}{P_{sat}} \cdot 100[\%]$$

Note que si $P_v = P_{sat}$, se tiene humedad relativa de 100%.

Material higroscópico:

Se dice de los materiales que tiene afinidad hacia la humedad.

Punto de rocío (Dew point):

Es la temperatura de saturación de una mezcla de gas y vapor de agua, por ejemplo, si se reduce la temperatura de una mezcla hasta el punto que se inicia la condensación se ha llegado a la temperatura de punto de rocío, por lo que se tendrá una $P_v = P_{sat}$. Si la temperatura de rocío es inferior a 0[°C], se pasa a llamar *Punto de escarcha (Frost Point)*.

Temperatura de bulbo seco:

Es la temperatura que tiene la mezcla (con vapor de agua), y generalmente es medida por un termómetro. La singularidad del nombre será explicada más adelante, cuando se emplee la variable.

Temperatura de bulbo seco:

Es la temperatura de equilibrio que se alcanza en la superficie de una película de agua que se evapora sin aplicarle calor (proceso adiabático), éste concepto está vinculado con el anterior, por lo que será explicado posteriormente.

Ecuaciones:

Se desea encontrar una fórmula aproximada que permita calcular el valor de H_r , dado que H_r es una de las variables más representativas de la humedad. Por definición:

$$H_r = 100 \cdot \frac{P_v}{P_{sat}} \quad (1)$$

Se debe determinar entonces P_v y P_{sat} , por aproximación de Antoine:

$$P_{sat} = P \cdot \frac{m_{sat} / \mu_v}{m_{sat} / \mu_v + m_a / \mu_a} \approx \alpha \cdot e^{\frac{-\beta}{T+\gamma}}$$

Donde:

- P → Presión atmosférica (aire seco + vapor de agua).
- T → Temperatura ambiente en [°K].
- m_{sat} → Masa en [Kg] de agua en saturación.
- m_a → Masa en [Kg] de aire seco.
- μ_v → Masa en [Kg] de una molécula de vapor de agua.
 $\mu_v = 2\mu_H + \mu_O = 2.991 \cdot 10^{-26}$
- μ_a → Masa en [Kg] de las moléculas de aire seco (composición promedio).
 $\mu_a = 0.781\mu_{N_2} + 0.21\mu_{O_2} + 0.009\mu_{Ar} = 4.808 \cdot 10^{-26}$,
 suponiendo que el aire seco está compuesto por 78.1% de N_2 , 21% de O_2 y 0.9% de Ar. Los valores μ son sacados de la tabla periódica de los elementos, y corresponden a el peso atómico del elemento, dividido por la constante de Avogadro (6.022E23).
- α, β, γ → Coeficientes que serán determinados evaluando 3 pares (T, P_{sat}) conocidos por tablas.

Note que m/μ , corresponde a la cantidad de átomos de cada caso. Además observe que la fracción que multiplica a P , equivale a la razón entre la cantidad de átomos de vapor de agua, y la cantidad de átomos de aire húmedo (con vapor incluido). Ello representa la fracción de presión atmosférica debido al vapor de agua en estado de saturación.

Reemplazando α , β y γ , que se obtienen de reemplazar 3 pares de valores de (T, P_{sat}) de las tablas de Boltz y Tuve a una presión $P = 1.013E5$ [Pa] (presión atmosférica standard), se obtiene la expresión equivalente:

$$P_{sat} \approx 4.969 \cdot 10^9 \cdot e^{\frac{3333}{T-64.6}} \quad (2)$$

La aproximación es bastante cercana a la realidad, y los valores que se calculan a partir de ella no difieren mayormente de los de las tablas psicrométricas.

Existen otras aproximaciones para el P_{sat} , que se calculan de la misma manera, a continuación se entrega una de ellas:

$$P_{sat} \approx \gamma \cdot \left(\frac{T \cdot \alpha}{T + \beta} \right) \quad (3)$$

Donde:

$$\gamma = 6.1078 \cdot 10^2$$

$$\text{si } T > 0 \rightarrow \begin{cases} \alpha = 7.5 \\ \beta = 237.3 \end{cases}$$

$$\text{si } T < 0 \rightarrow \begin{cases} \alpha = 9.5 \\ \beta = 265.5 \end{cases}$$

Basta ahora determinar el valor de P_v , lo cual se logra con una aproximación similar:

$$P_v \approx \gamma \cdot \left(\frac{T_d \cdot \alpha}{T_d + \beta} \right) \quad (4)$$

Donde T_d es la temperatura de punto de rocío. Si se mide el valor T_d , se puede obtener un valor para H_r , ello se puede hacer en forma directa, o a través de formulas que permitan calcular T_d a partir de otras variables medidas. Por ejemplo se puede determinar T_d , a partir de la temperatura de bulbo húmedo (T_h). Una relación que permite calcular directamente P_v teniendo ésta temperatura se aprecia a continuación:

$$P_v \approx P_{sat}(T) - P \cdot (T - T_h) \cdot 0.00066 \cdot (1 + 0.00115 \cdot T_h) \quad (5)$$

Finalmente basta reemplazar (4) o (5) en el numerador de (1), y (2) o (3) en el denominador de (1), para obtener la medida de H_r .

Observando las expresiones anteriores, se puede concluir, que para determinar el valor de H_r , es necesario medir 2 temperaturas, T que es la temperatura ambiental (o de bulbo seco), y T_d (temperatura de punto de rocío) o en su efecto T_h (temperatura de bulbo húmedo). Para ello se estudiará en la siguiente sección como se pueden medir estas variables.

Sensores y principios de funcionamiento:

i) Sensores mecánicos (por deformaciones):

La idea de este tipo de sensores, es aprovechar los cambios en las dimensiones que sufren ciertos tipos de materiales en presencia de la humedad. Los más afectados son algunas fibras orgánicas y sintéticas, como por ejemplo el cabello humano. Al aumentar la humedad relativa, las fibras aumentan de tamaño, es decir, se alargan. Luego esta deformación debe ser amplificada de alguna manera (por palancas mecánicas, o circuitos electrónicos), y debe ser graduada de acuerdo a la proporcionalidad con la humedad relativa. Lo anterior se aprecia en el esquema de la figura 1:

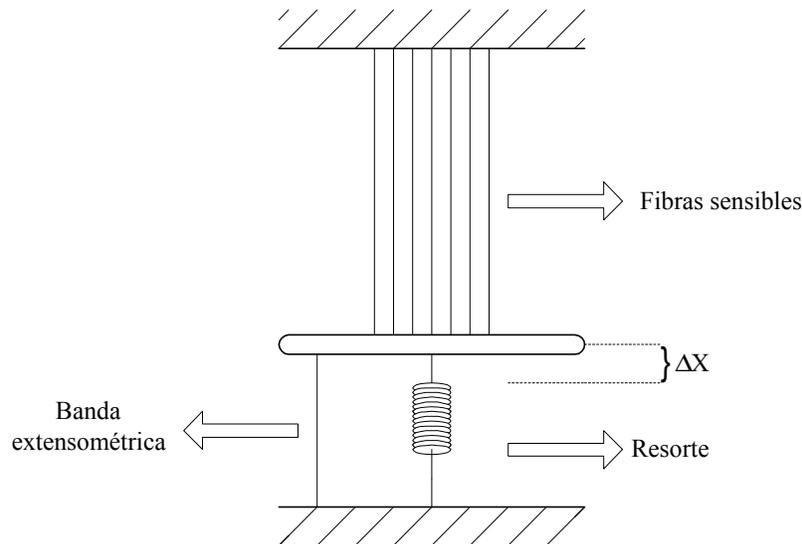


Figura 1

El desplazamiento (ΔX) puede ser medido de diversas maneras, en la figura 1, se aprecia una de ellas, la cual consiste en ubicar una banda extensométrica (filamento resistivo, que puede ser metálico o semiconductor) entre la parte móvil y la estable. Al variar ΔX en forma proporcional a la humedad presente, también lo hará la banda cambiando la resistencia de ella, luego la variación de la resistencia puede ser convertida a voltaje usando algún circuito de medición de ΔR , como lo es el puente de Wheatstone. En la figura 2 se puede apreciar un diagrama explicativo de cómo se relacionan las variables que intervienen en la medición.

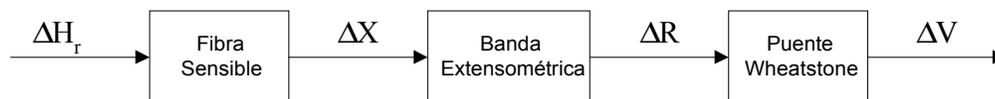


Figura 2

El error de medición de este tipo de sensores es mínimo de 3%, y su ventaja radica principalmente en que es fácil de reproducir, sin embargo, es poco robusto y no es de gran utilidad en aplicaciones industriales. Su rango de operación es de humedades relativas entre

15% y 95%, a temperatura ambiente entre los $-20[^\circ\text{C}]$ y $70[^\circ\text{C}]$. Uno de los requisitos para lograr una medición más confiable, es que el aire circule a una velocidad de $3[\text{m/s}]$. La calibración del sensor será explicada más adelante.

ii) *Bulbos húmedo y seco:*

Este psicrómetro se basa fundamentalmente en la medición de temperatura, para a partir de ella deducir la cantidad de agua evaporada presente en una mezcla gaseosa. La idea consiste en disponer de 2 termómetros lo más idéntico posibles, con uno de ellos se debe medir la temperatura de la mezcla (temperatura de bulbo seco), y con el otro, la temperatura en la superficie de una película de agua que se evapora en forma adiabática (temperatura de bulbo húmedo), esto se logra envolviendo el bulbo de uno de los termómetros con un algodón humedecido con agua (de ahí el nombre de la variable). Las moléculas de agua presentes en el algodón absorberán la energía necesaria para evaporarse del bulbo del termómetro, bajando la temperatura del mismo algunos grados por de bajo comparado con la temperatura del termómetro seco. Al conocerse el valor de ambas variables es posible determinar la humedad relativa, basta recurrir a las ecuaciones, tablas o gráficos psicrométricos. En un ambiente saturado, la cantidad de moléculas que se evaporan del bulbo húmedo son equivalentes a las que se condensan en él, por lo que ambos termómetros registran temperaturas idénticas. En la figura 3 se puede apreciar un diagrama explicativo de cómo se relacionan las variables que intervienen en la medición.



Figura 3

Cabe señalar que en la actualidad ya no se emplean algodones ni termómetros convencionales, sino más bien mechas que envuelven termo-cuplas o termo-resistencias (de platino) conectadas con algún recipiente de agua que gracias al fenómeno de la capilaridad se mantienen húmedas. En algunos casos la mecha se puede ensuciar, alterando la capilaridad del material. Por ello se emplean también dispositivos cerámicos porosos que envuelven el bulbo y están en contacto con el agua. En la figura 4 se puede observar un esquema de las partes de un sensor de bulbo húmedo y seco:

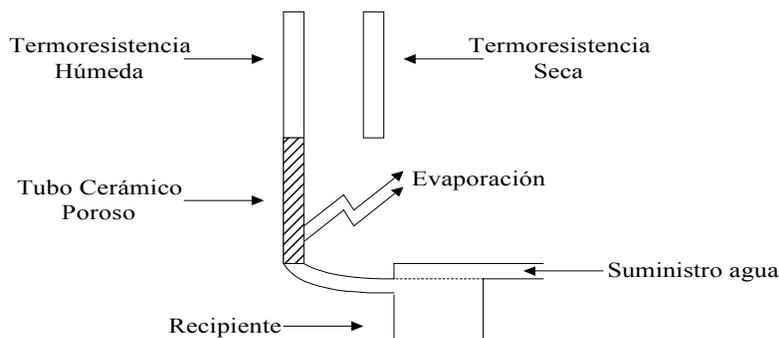


Figura 4

Este sensor requiere también una circulación de aire con una velocidad de 3[m/s], para que la medición no corresponda a una humedad relativa localizada alrededor de los termómetros, para ello se pueden emplear ventiladores. Con este tipo de medición se logran valores de H_r de sólo 0.5% de error, sin embargo su flaqueza radica en que introduce vapor de agua al ambiente que se desea medir, lo cual en algunos procesos puede ser un inconveniente. Los rangos de operación van de 0% a 100% de humedad relativa, y de 0[°C] a 90[°C].

iii) Sensores por condensación:

Como ya se enunció anteriormente, otra variable que nos permite calcular H_r es la temperatura de punto de rocío. Para medir esta variable se emplea un dispositivo como el que se ilustra en la figura 5:

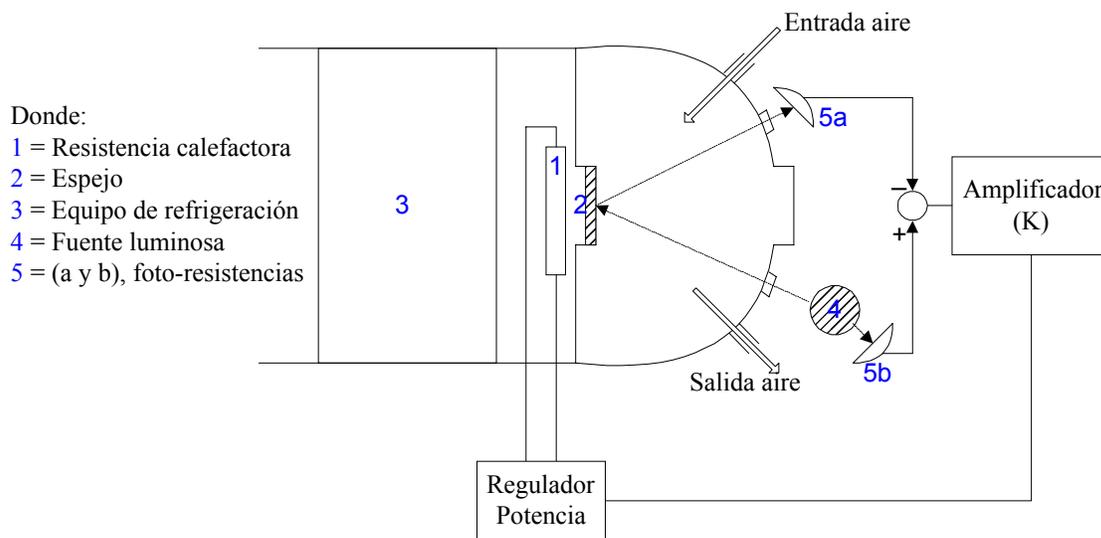


Figura 5

Se hace circular la mezcla gaseosa por una cámara provista en su interior de un espejo (2). El cual puede ser enfriado o calentado por un equipo de refrigeración (3) o calefactor (1) respectivamente, con la finalidad de poder lograr que el vapor se condense en el espejo o el agua se evapore de el. Además se cuenta con una fuente luminosa (4) que es proyectada sobre el espejo, el cual refleja el haz hacia una foto-resistencia (5a). La luz también incide en una segunda foto-resistencia (5b) en forma directa. Se tiene entonces una medición de la intensidad luminosa real (5b), y una distorsionada según la cantidad de condensación presente en el espejo (5a), el error entre ambas es amplificado y sirve de actuación sobre el regulador de potencia que controla el calefactor, en resumen es un lazo cerrado de control que logra temperar la superficie del espejo hasta llegar al punto de rocío, basta medir el valor de la temperatura superficial y acudir a las ecuaciones, tablas o gráficos psicrométricos para obtener H_r . En la figura 6 se aprecia un diagrama que relaciona las variables involucradas.

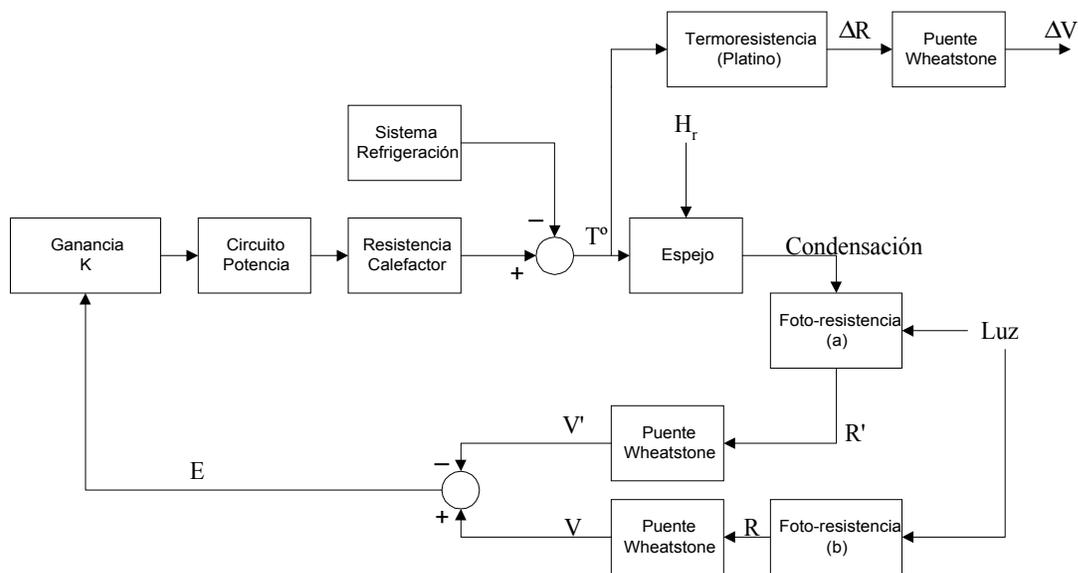


Figura 6

Los rangos de operación del psicrómetro anterior son de $-70[^\circ\text{C}]$ a $40[^\circ\text{C}]$ en la medición del punto de rocío, y la precisión es de un 99,5%. La limitante de este método es que el gas debe ser transparente, y libre de impurezas, de otro modo se estaría alterando su principio de funcionamiento.

iv) Sales higroscópicas:

Una sal higroscópica (cloruro de litio por ejemplo), es una molécula cristalina que tiene gran afinidad con la absorción de agua. En la figura 7 se ilustra un sensor que utiliza este fenómeno para deducir el valor de la humedad en el ambiente.

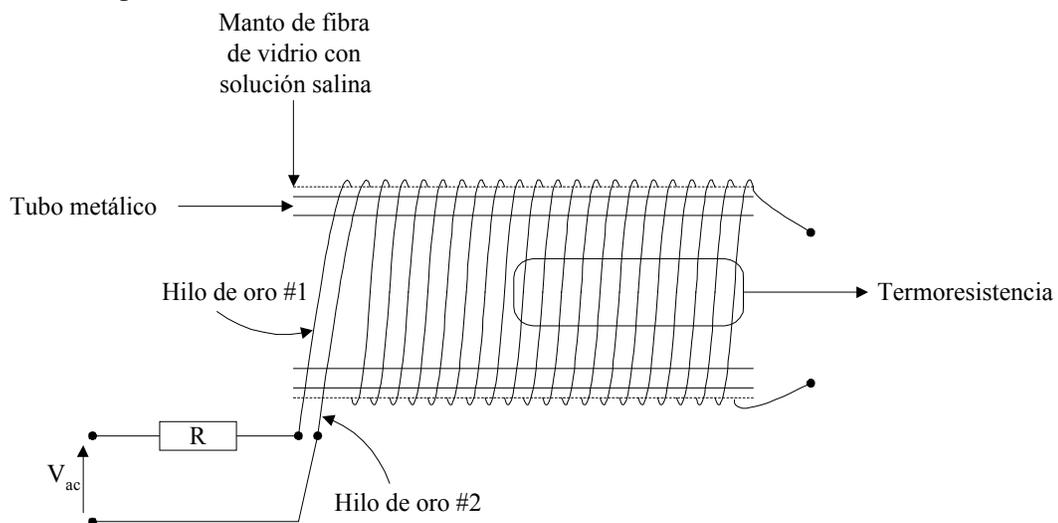


Figura 7

El sensor está compuesto por un tubo metálico, rodeado de un tejido de fibra de vidrio, que a su vez se encuentra impregnado de una solución salina saturada (higroscópica) compuesta de cloruro de litio y agua. Hay dos alambres de oro que rodean el manto de fibra (sin cruzarse), los cuales se encuentra inmersos en la solución, se encuentran con sus extremos abiertos, pues la solución se encarga de cerrar el circuito. La solución de cloruro de litio se comporta como un conductor ideal, debido a la disociación iónica que sufre en presencia de agua, por lo que se puede considerar que los hilos de oro se encuentran cortocircuitados. Por ello se dispone de una resistencia R , limitadora de corriente.

Por disipación de potencia la resistencia libera energía en forma de calor, evaporando el agua de la solución salina. Baja entonces la concentración de iones, a medida que se evapora el agua, quedando cristales salinos. Por ello se reduce la conductividad eléctrica, y disminuye el calor disipado evaporándose menos agua. Pero al formarse cristales se está invirtiendo el proceso, iniciándose la reabsorción del fluido, la idea es que se llegue a un punto de equilibrio, en que la cantidad de agua evaporada por aumento de temperatura equipare la cantidad de agua absorbida por los cristales. La temperatura de equilibrio lograda es transmitida por el tubo metálico hacia el interior de éste, donde es medida por una termo-resistencia (de platino). La temperatura es proporcional al punto de rocío, finalmente basta calibrar el sensor para obtener mediciones correctas. El diagrama de bloques que relaciona las variables involucradas se aprecia en la figura 8.

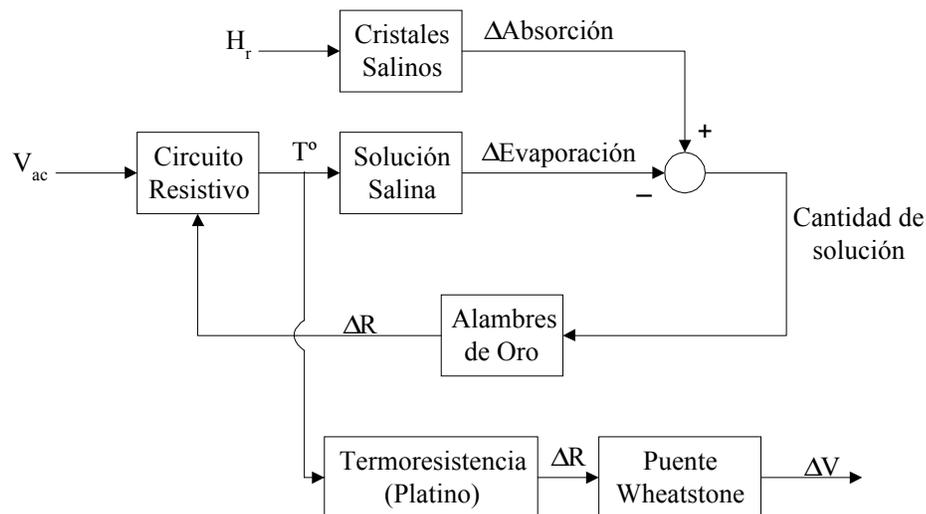


Figura 8

Resulta conveniente lavar el sensor con agua destilada, y reacondicionar la solución salina cada cierto tiempo (cada 3 meses). Con este dispositivo se pueden medir temperaturas de rocío, que comprenden de $-45[^\circ\text{C}]$ a $90[^\circ\text{C}]$, y humedades relativas de 15% a 100%, lo cual junto con un error de medición del orden de 0.5% ha significado que este tipo de sensores sean muy difundidos en la industria.

v) **Sensores electrolíticos:**

Se sabe que una molécula de agua puede descomponerse por electrólisis, cuando esto ocurre se liberan dos electrones por molécula, la idea entonces es producir la electrólisis de las moléculas de agua presentes en el gas, y medir la corriente que se genera cuando aquello ocurre. En la figura 9 se aprecia un esquema del dispositivo (también llamado célula) que opera en base a este principio.

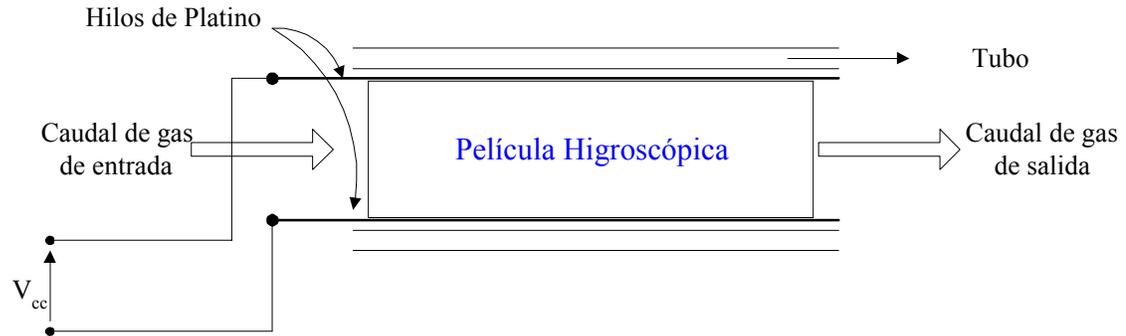
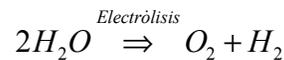


Figura 9

El filamento cargado positivo se llama ánodo, y en el se produce el gas oxígeno (O_2), el filamento con carga negativa se llama cátodo, y en el se produce el gas hidrógeno (H_2), la reacción química equivalente es la siguiente:



Tal como se aprecia en la figura 9, se impulsa la mezcla gaseosa a través de un tubo que contiene en su interior ambos electrodos. Para poder capturar una cantidad de agua proporcional a la humedad existente en la mezcla (para producir la electrólisis), se cuenta con una película altamente higroscópica de pentóxido de fósforo, que absorbe la humedad del gas y posiciona las moléculas de agua entre los alambres de platino. La diferencia de potencial entre los electrodos descompone el agua en iones de hidrogeno y oxigeno, generándose una corriente, que es proporcional a la humedad presente en el tubo. El flujo del gas debe ser constante, y dependerá de las dimensiones del tubo (generalmente es de $100[\text{cm}^3/\text{min}]$). La figura 10 corresponde al diagrama de dependencia de las variables involucradas.

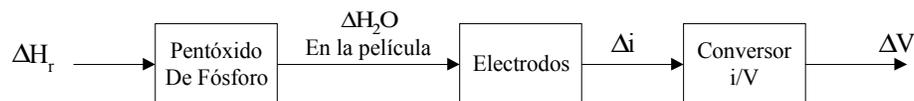


Figura 10

Este sensor no puede ser utilizado para cualquier aplicación, dado que si el gas contiene elementos que reaccionan con el pentóxido de fósforo se estaría alterando la medición (gas con amoníaco, por ejemplo). El sensor se satura si la muestra contiene más de 2000 PPM (partes por millón) de agua, pues la película higroscópica no es capas de

absorber más líquido, produciéndose entonces un cortocircuito entre el ánodo y cátodo, invalidando la medición. La certeza en la medición es de 99.5%, y el rango operativo es de 0 a 1000 PPM. Una aplicación adicional de este dispositivo, es la medición de la cantidad de agua presente en muestras líquidas que no sufran electrolisis, midiendo de esa manera sólo la descomposición de las moléculas de agua presentes.

vi) Sensores por conductividad:

Si se tiene una superficie cualquiera en presencia de una mezcla gaseosa con vapor de agua, siempre habrá cierta cantidad de moléculas de agua presentes en dicha superficie. La presencia de agua permite que a través de la superficie circule una corriente, en ello se basan los sensores por conductividad. En la figura 11, se aprecia la disposición de las partes que componen este tipo de sensores.

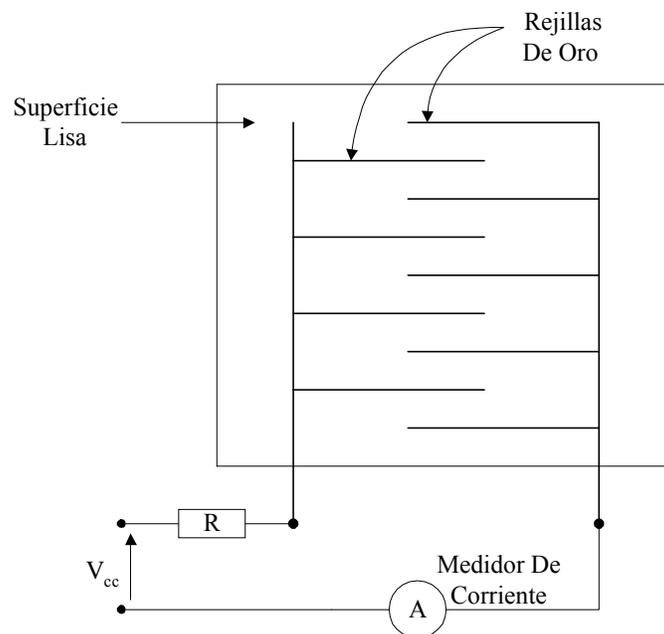


Figura 11

Se dispone de una superficie pulida, no conductora, sobre la cual se posicionan dos rejillas de oro entrelazadas, sin tocarse. Según sea la H_r presente, habrá una cantidad de moléculas de H_2O proporcional a ella. Luego al ser conectados los alambres de oro a una diferencia de potencial continua, se producirá una corriente que estará en directa relación con la cantidad de moléculas presentes en la superficie. Se debe conectar un amperímetro en serie para poder registrar la corriente generada. La resistencia R , es una medida de seguridad en caso de cortocircuitos. Basta calibrar el sensor para obtener medidas de humedad de la mezcla. Al igual que la mayoría de los sensores anteriores se debe proporcionar un flujo de la muestra, para que la medición sea válida. Este sensor no es muy útil, dado que la superficie puede ensuciarse, y no se obtiene un rango de medición grande. El diagrama que ilustra las relaciones entre las variables involucradas, es similar al de la figura 10. Solo cambia la película higroscópica por una superficie no conductora.

vii) Sensores capacitivos:

Son quizás los más difundidos en la industria y meteorología, pues son de fácil producción, bajos costos, y alta fidelidad. El principio en el cual se basa este tipo de sensores, es en el cambio que sufre la capacidad (C en [Farad]) de un condensador al variar la constante dieléctrica del mismo. Si se utiliza la mezcla gaseosa como dieléctrico entre las placas del condensador, el valor de este estará determinado por:

$$C = \epsilon \frac{A}{d}$$

Donde:

- C , es el valor de la capacidad.
- ϵ , es la permitividad del dieléctrico (constante dieléctrica).
- A , el área de las placas del condensador.
- D , la distancia entre las placas del condensador.

Una molécula de agua está compuesta por 2 átomos de hidrogeno y 1 de oxigeno. Los átomos de hidrogeno se encuentran unidos al oxigeno a través de un enlace covalente, que se produce al compartir un electrón, sin embargo, lo anterior ocurre en forma desequilibrada geoméricamente hablando. Lo cual se traduce en que una molécula de agua tenga una disposición neta de sus cargas, similar a las de un dipolo eléctrico. En la figura 12 se aprecia el modelo de una molécula de agua:

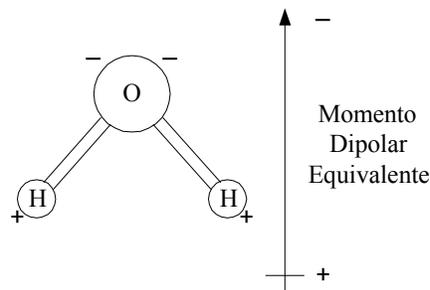


Figura 12

Dado a la naturaleza polar del agua, en presencia de un campo eléctrico, se produce la alineación de la moléculas, siendo esta la causa del porque el agua presenta una constante dieléctrica (80) mayor que el aire (1). Luego si se utiliza como dieléctrico, una mezcla gaseosa que contenga vapor de agua, el valor C del condensador va a variar dependiendo de la cantidad de moléculas de agua que estén presentes entre las placas. En consecuencia basta medir, o convertir el cambio de capacitancia, a otro tipo de variable eléctrica más fácil de manejar, lo anterior se puede lograr con un puente de Wheatstone de condensadores, o un circuito resonante, o también utilizar el condensador como componente de un oscilador a estable que varía su frecuencia de acuerdo al cambio de C .

La implementación de este sensor puede ser de variadas formas, ya sea con placas cilíndricas concéntricas o placas rectangulares paralelas. También se puede emplear un

material higroscópico, para aumentar la concentración de agua entre las placas. En la figura 13 se aprecia un esquema posible de construcción.

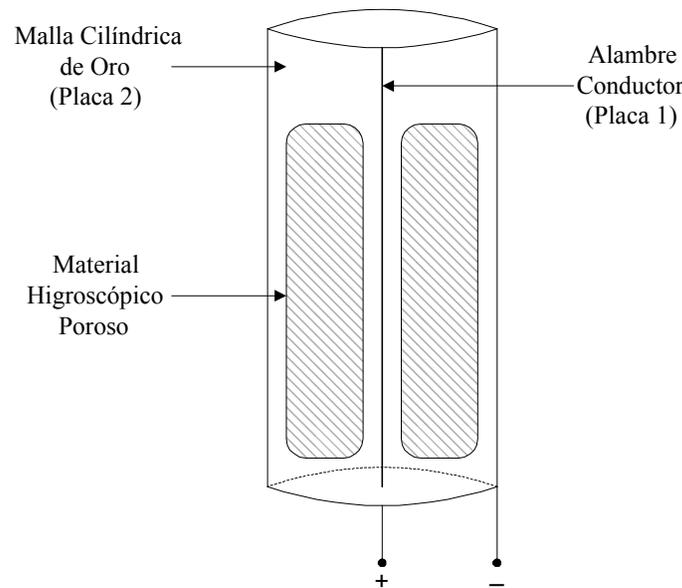


Figura 13

Se utiliza como una de las placas un alambre conductor, mientras la otra es una malla fina de oro que permite el paso del gas, pero retiene impurezas. Como dieléctrico se utiliza un material higroscópico poroso (cerámico) que rodea el alambre, el cual absorbe el agua de la muestra, aumentando aun más la constante dieléctrica del condensador, en proporción a la H_r existente. Las relaciones entre las variables físicas que son consideradas en este sensor se aprecian en la figura 14.

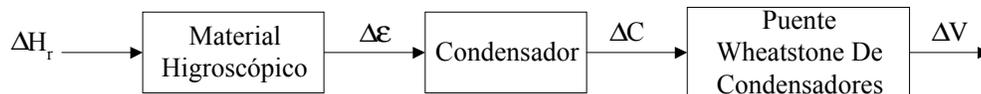


Figura 14

Conviene limpiar el sensor periódicamente, con el fin de no obstruir la circulación de aire a través del manto, y por ende no alterar la medición. Son robustos y tienen excelente precisión, además de operar en rangos de temperaturas de $-80[^\circ\text{C}]$ a $60[^\circ\text{C}]$.

viii) Sensores infrarrojos:

Las moléculas (cualesquiera), no son estructuras rígidas e inmóviles, poseen movimientos rotatorios alrededor del centro de masa, y movimientos vibratorios (de sus componentes atómicos), similares a un movimiento armónico simple. Ambas energías, tanto la rotatoria como la de vibración están cuantizadas, y para que la molécula pase de un nivel energético a otro se requiere por lo tanto, de una cantidad de energía específica, que depende del tipo de molécula que se esté considerando. Lo anterior origina la teoría de

espectros moleculares. Dado que las ondas electromagnéticas poseen cierta cantidad de energía dependiendo de la longitud de onda de la misma, las moléculas absorberán o emitirán ondas de frecuencias muy específicas, cuya energía sea equivalente a las transiciones energéticas que presente la molécula. La fórmula matemática que permite calcular la energía de una onda esta dada por:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Donde:

- E, energía.
- ν , frecuencia.
- λ , longitud de onda.
- h , constante de Planck = 6.63×10^{-34} [Js].

En el caso del agua una de las radiaciones que absorbe, se ubica en la porción infrarroja del espectro, concretamente en $\lambda = 1400$ [nm] y $\lambda = 1930$ [nm]. Se puede aprovechar esta propiedad para medir la cantidad de agua presente en un gas. La idea consiste en proyectar una fuente de rayos infrarrojos a través de la muestra que se desea medir, y recoger en el otro extremo la radiación resultante, empleando un receptor adecuado para tal propósito. La figura 15 ejemplifica el procedimiento.

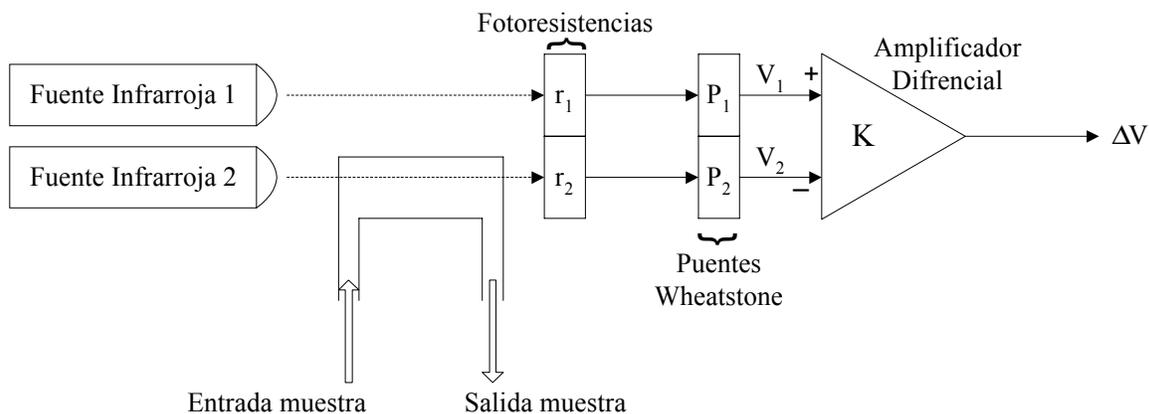


Figura 15

Se dispone de 2 fuentes infrarrojas idénticas (1 y 2), la primera se toma como referencia y es medida por una foto-resistencia (r_1), la segunda atraviesa la muestra con vapor de agua, el cual absorbe parte de la radiación e incide en el otro detector (r_2), ambos valores resistivos son transformados a voltaje por puentes de Wheatstone, para finalmente ser comparados con un amplificador diferencial. La diferencia entre ambos va a ser proporcional a la cantidad de humedad presente en la muestra, con lo que se logra una medida de la variable deseada. Los sensores que utilizan este método son muy sensibles y logran precisiones desde 0,05 a 30.000 PPM, en rangos de temperatura que comprenden de -85 [°C] a 40 [°C]. Lógicamente no conviene utilizarlos en el caso de tener mezclas con materiales particulados.

Cabe señalar que todo el procedimiento anterior se puede realizar análogamente para frecuencias en la parte ultravioleta del espectro, donde el agua absorbe longitudes de onda de alrededor $\lambda = 121.66$ [nm].

ix) Sensores piezoeléctricos:

Los cristales poseen frecuencias de oscilación bastante estables, sin embargo, al cambiar la masa del cristal por deposiciones de materiales sobre el, éste experimenta una variación de 2000[Hz] en su frecuencia de oscilación por cada microgramo [μg] de aumento de material sobre su superficie. Por ello son empleados en la medición de humedad, dado que basta cubrirlos con un material higroscópico, para que aumente la cantidad de agua sobre el cristal en forma proporcional a la humedad absoluta presente. A mayor masa, menor es la frecuencia de oscilación, con este sistema se pueden detectar hasta variaciones de $\pm 0.1[\text{Hz}]$, lo cual equivale a humedades de alrededor de 0.1 PPM. Son sensores bastante robustos, y como ya se indicó muy sensibles, otra ventaja es que son de transientes cortas, y entregan una medida en forma de frecuencia, la cual puede ser utilizada para control con PLL, o para ser convertida a voltaje. La figura 16 representa un esquema del sensor anteriormente expuesto.

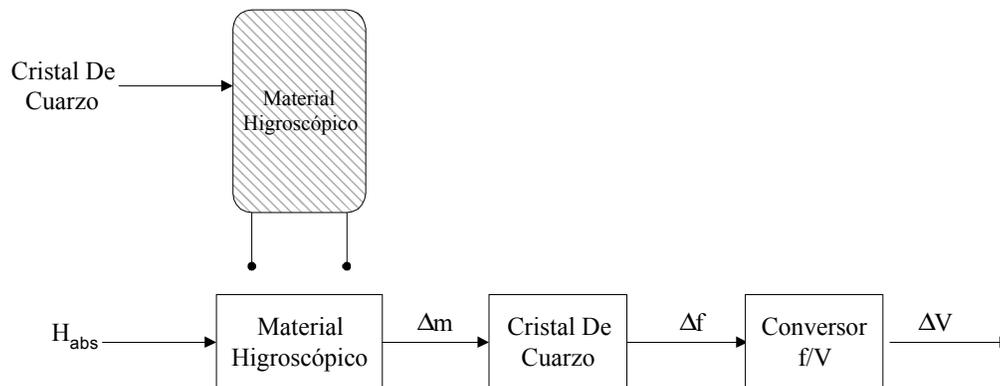


Figura 16

x) Sensores de humedad en el suelo:

Se aplica un principio similar al visto en el punto *vi*), se trata de utilizar la conductividad de la muestra (tierra), la cual va a ser mayor mientras más sea la cantidad de agua presente en ella. Se introducen dos electrodos separados por cierta distancia, para luego ser sometidos a una diferencia de potencial constante. La corriente circulante será entonces proporcional a la cantidad de agua presente en la muestra. En la figura 17 se aprecia un esquema de medición.

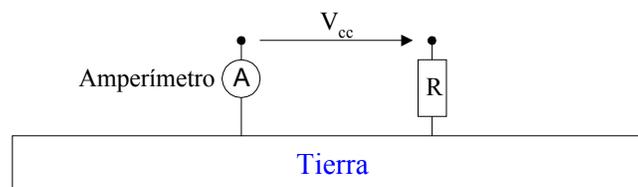


Figura 17

R es sólo una medida de protección en caso de corto circuito. La desventaja de este método es que si se agregan fertilizantes, o cambia la constitución de la mezcla, se tendrá que volver a calibrar el instrumento. Se recomienda además aplicar tiempos de medición cortos, dado a que los electrodos se pueden deteriorar. O para prevenir esta situación utilizar voltajes alternos, sin embargo se requerirá transformar la corriente alterna medida a una señal continua, en vista que la mayoría de los sistemas de adquisición de datos trabajan en modo cc.

Otra forma es utilizar la tierra (con agua) como dieléctrico, análogamente a lo realizado en el punto *vii*), en este caso se deberán introducir las placas del condensador paralelamente en la muestra. La constante dieléctrica de la mezcla será directamente proporcional a la cantidad de agua presente en ella, variando de esa manera el valor C del condensador. Siguiendo el mismo procedimiento ya explicado, basta con transformar el cambio de C a una señal de voltaje (puentes, osciladores o circuitos resonantes). La figura 18 ilustra una posible implementación.

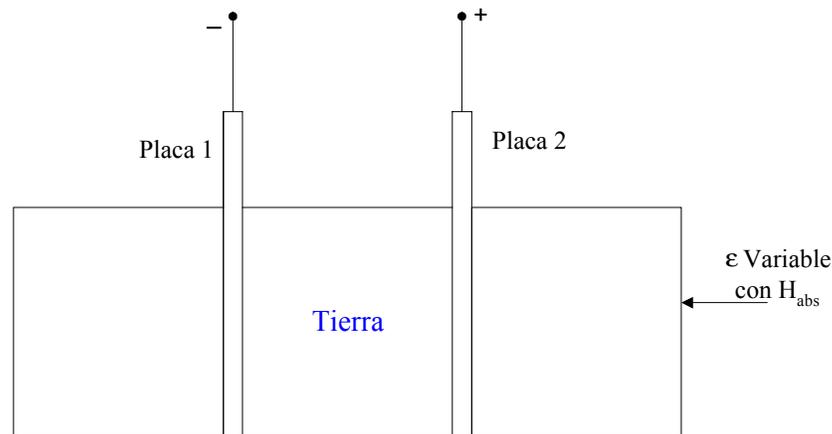


Figura 18

Técnicas de calibración:

En general cualquiera de los sensores anteriormente descritos, necesita ser calibrado, para ello existen variados procedimientos, y su eficacia va a depender para que tipo de propósito se desea emplear el sensor. Cabe señalar que cualquier sensor de humedad existente en el mercado, que venga con calibración garantizada, serviría para calibrar un instrumento nuevo, si embargo, como se pretende ahorrar costos, conviene conocer algunas formas practicas para lograr el cometido.

i) Calibración por variación de masa:

Es la forma más lógica de calibrar un instrumento. Se basa en la idea de pesar una muestra antes y después de extraer el vapor de agua de la misma, es decir, se pesa la muestra con agua incluida, luego es calentada para extraer toda molécula de H₂O presente (lo máximo posible), se vuelve a pesar ahora la muestra seca. La resta de ambas indica la masa de agua presente. Luego la razón entre la masa de agua obtenida y el volumen inicial de la mezcla corresponde a la H_{abs}. Este procedimiento es bastante utilizado para calibrar sensores de humedad de tierra u otras sustancias sólidas.

En gases es más práctico hacer pasar cierto volumen (conocido) de una muestra por un tubo provisto de una cierta cantidad de un material higroscópico. Se debe tener el peso del material antes y después de absorber el agua del gas, la diferencia entre ellos corresponde al peso del agua absorbida, y en consecuencia, de la cantidad de vapor presente en la muestra. Luego la razón entre la masa de vapor determinado, y el volumen total de la muestra empleada, corresponde a la H_{abs} presente.

ii) Por monitoreo de referencias (meteorología):

Si la función del sensor es medir la humedad atmosférica, basta llevar un registro de mediciones realizadas en cierto periodo de tiempo, y luego compararlas con las recogidas por una oficina meteorológica oficial (local).

iii) Por referencia de soluciones salinas:

Se debe disponer de un ambiente pequeño y aislado con la presencia de una solución salina saturada, de manera de lograr en estado estacionario un valor de H_r constante. Se introduce en este ambiente el artefacto a calibrar, y luego se contrasta el valor experimental obtenido con los de la siguiente tabla:

| Sal | 20°C / 68° F | 25°C / 77° F |
|-------------------|--------------------|--------------------|
| Sulfato de Amonio | 81% H _r | 80% H _r |
| Nitrato de Amonio | 65% H _r | 62% H _r |

| | | |
|----------------------|--------------------|--------------------|
| Carbonato de Potasio | 44% H _r | 43% H _r |
| Acetato de Potasio | 22% H _r | 22% H _r |

Estas sales logran que el aire tenga los valores de H_r tabulados a las temperaturas respectivas.

Efectos negativos sobre la calibración:

Un dispositivo correctamente calibrado no permanecerá en ese estado para siempre, de hecho existen varios factores que se deben considerar para mantener un sensor en correcto funcionamiento:

i) Temperatura:

La temperatura puede afectar ciertos sensores, especialmente los que son calibrados a ciertas temperaturas constantes. Además si el sensor contiene resistores y condensadores como partes fundamentales de la medición, se deberá idear un sistema que regule la temperatura de tal modo que afecte lo menos posible. Por ejemplo los puentes de Wheatstone están conformados por resistencias o condensadores (según sea el caso) de valores idénticos, por ello fluctuaciones de temperatura podrían desequilibrar el puente alterando su precisión.

ii) Presión:

Cambios de presión pueden afectar la calibración de un sensor, sin embargo, constituye un problema menor, dado que el valor del cambio de presión es fácilmente obtenible, con lo que se puede compensar las fluctuaciones que experimente el girómetro.

iii) Caudal:

Los caudales de muestras que serán sensados, deberán ser lo más constantes posibles, además de ser lo suficientemente veloces para no crear mediciones erradas, y lo suficientemente lentos para no producir presiones adicionales en el interior de los ductos de medición.

iv) Contaminantes:

Resulta obvio proteger el sensor de todo tipo de impurezas, que puedan alterar su funcionamiento. Lo anterior resulta muy importante en los sensores de tipo capacitivos, ya que la presencia de materiales extraños podría alterar la constante dieléctrica del mismo. También se debe tener especial cuidado en los sensores que utilizan materiales higroscópicos, puesto que se puede alterar la composición química de la sal empleada, induciendo así errores no deseados.

En general, se recomienda calibrar y realizar la mantención de los sensores cada cierto intervalo de tiempo, ello va a depender tanto del tipo de sensor empleado como el uso que se le dé en la práctica.

Aplicaciones:

Son innumerables la cantidad de áreas distintas en que se emplean los sensores de humedad, a continuación se entrega una lista con las aplicaciones más relevantes:

i) Confort humano (ambientación):

Para nadie es un misterio que ante la presencia de un alto porcentaje de H_r , nos empezamos a sentir incómodos, sin embargo, el alto costo de ambientación no es abordable por una familia normal, por lo que esta aplicación existe a nivel de servicios, que es brindado por empresas del rubro del turismo (Hoteles, Aviones, Oficinas, Cines y Piscinas).

ii) Industria textil, papelera y de pieles:

Como ya se explicó anteriormente la humedad altera la estructura de ciertas fibras y tejidos, esto afecta la calidad del producto elaborado. Por ello es muy común apreciar la aplicación de sistemas de regulación de humedad en industrias relacionadas con estos productos.

iii) Industria maderera:

El problema es similar al anterior, las maderas sufren deformaciones ante cambios de humedad, y pueden llegar a desarrollar hongos, agrietamiento e incluso cambios de coloración.

iv) Industria alimenticia:

La mayoría de los alimentos contienen o son preparados con grandes cantidades de agua, la regulación del monto de liquido presente es vital para lograr un producto óptimo y estandarizado. Las aplicaciones más frecuentes son:

- Deshidratación (frutas, pastas, café, sopas, etc).
- Panadería.
- Refrigeración de frutas y carnes.
- Conservación de vinos finos.

v) Industria farmacológica:

Los medicamentos son elaborados bajo estrictas medidas de calidad, en ello la humedad juega un rol importante, dado a que se emplea el uso de agua en la fabricación de muchos remedios, además de existir algunos procedimientos en que la presencia de agua no es deseada.

vi) *Meteorología:*

Es quizás la aplicación más común, o más conocida, de estos sensores. La humedad es una de las variables fundamentales en el estudio de la meteorología, y por ello es necesario contar con medidores muy precisos, para poder llevar registros, o realizar investigación científica.

vii) *Industria química- biológica:*

Se aplican en cultivos de bacterias, para estudiar su comportamiento ante los antibióticos, esto es realizado bajo condiciones de climatización extrema, en donde el control de humedad es fundamental.

viii) *Conservación y almacenamiento:*

Como ya se ha enunciado antes la humedad altera las propiedades físicas, químicas y biológicas de una infinidad de materiales, sustancias u organismos. Por ello es una variable medida y controlada, especialmente en bodegas de almacenamiento (de largos periodos de tiempo), con el fin de evitar el deterioramiento de las especies afectadas. Es muy común emplear este tipo de sensores en la conservación de obras de arte (pinturas, esculturas y libros).

Conclusiones y Comentarios:

- Como se pudo apreciar existe una gran cantidad de sensores de humedad en el mercado, para elegir el más adecuado se deberán tener en cuenta varios factores, como rangos de medición, robustez, durabilidad, repuestos, precisión, precio, etc. Además de estudiar cual es el más apropiado para el tipo de proceso en que se va a utilizar.
- La calibración es un aspecto muy importante, y no deberá ser olvidado durante la vida útil del sensor, puesto que como se expuso anteriormente, pueden haber factores que desvirtúen progresivamente la calidad de la medición, si no se aplican medidas de corrección a tiempo.
- Las ecuaciones, tablas o gráficos empleados para obtener el valor de H_r , a partir de otras variables medidas, pueden llegar a significar grandes cantidades de cálculos, y en consecuencia el agotamiento de los recursos computacionales con que se cuenta. Por ello es aconsejable estudiar la posibilidad e incorporar aproximaciones o interpolaciones, a los cálculos a realizar.

Bibliografía:

- Sears, F., Zemansky, M., Young, H. y Freedman, R., “*Física Universitaria Volumen 2*”, Addison Wesley Longman, 9ª Ed.
- González, J., “*Transductores y medidores electrónicos*”, Marcombo Boixareu Editores.
- Glaría, J., “*Ecuaciones del aire*”.
- Contenidos del ramo, “*Automatización Industrial*”, UTFSM, Valparaíso 2001.
- Babin, S., “*Water vapor Myths: A brief tutorial*”.
- Wiederhold, P., “*True accuracy of humidity Measurement*”.
- Dewcon Sensors, “<http://www.ko-en.com/>”.
- Remote Measurement Systems, Inc., “<http://www.measure.com/>”.