

CALIBRACIÓN DE HIGRÓMETROS PARA MADERA, MÉTODOS Y TRAZABILIDAD

Silvia Medrano, Víctor Aranda y Norma Velasco

MetAs & Metrólogos Asociados

Calle: Jalisco # 313, Colonia: Centro, 49 000, Cd. Guzmán, Jalisco, México

(341) 413 6123 & 413 1691 con tres líneas. metas@metas.com.mx

Resumen: Los higrómetros para madera miden el contenido de humedad dentro de la madera, la cual está en equilibrio con la humedad ambiental. Se describen los higrómetros para madera de tipo: contacto o resistivo; en base a la medición de conductividad eléctrica y de tipo no-contacto o capacitivos; en base a la medición de constante dieléctrica. Estos instrumentos se utilizan para la medición de humedad en equilibrio en el alcance de 6 al 30 %H₂O, en diferentes tipos de madera y materiales fabricados en base a madera. Se describe la calibración de estos higrómetros en base al método de puntos fijos, con muestras de madera en equilibrio con la humedad del aire mantenida en higróstatos de sales saturadas. Se describe la trazabilidad del contenido de humedad en equilibrio en madera (%H₂O) mediante la determinación de la humedad relativa del aire (%HR) y el conocimiento de constantes físicas.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente bajo el ambiente de competencia por desarrollar productos con mayor calidad y en forma más eficiente, es obligado en las empresas que determinen las especificaciones de sus productos mediante características que puedan ser medidas o cuantificadas y no solo mediante el monitoreo cualitativo de algunos rasgos del producto o de las materias primas.

Una de estas especificaciones, es el contenido de humedad en madera, derivados de la madera y papel, donde para muchas aplicaciones ya no es suficiente evaluar algunos rasgos de la misma como pudieran ser: ver el cambio en la tonalidad de su color para monitorear si ya se seco, esperar cierta cantidad de horas transcurridas en el horno de secado o cantidad de días de asoleo en la intemperie, o pasar la mano sobre la superficie de la madera para sentir si ya está seca; ciertas aplicaciones que se señalarán más adelante han requerido de nuevas tecnologías que les permitan medir el contenido de humedad en la madera, mediante instrumentos de medición que en la actividad diaria de control de calidad pueden ser utilizados en forma práctica y confiable.

Estas nuevas necesidades de medición también implican desarrollar servicios de calibración y prueba que permitan confirmar metrológicamente el comportamiento y funcionamiento de estos instrumentos.

En MetAs hemos desarrollado este servicio de calibración, ante la necesidad de dar solución a este

requisito metrológico de diferentes usuarios de este tipo de mediciones. Se ha pretendido ofrecer este servicio de calibración como laboratorio acreditado del Sistema Nacional de Calibración en la magnitud de humedad, el proceso de acreditación no se ha podido culminar debido a que en el país no existen referencias reconocidas en esta magnitud.

En este artículo se presenta brevemente, la investigación que se ha realizado con el propósito de ofrecer el servicio de calibración de higrómetros de madera en aplicaciones de metrología técnica e industrial de una forma metrológicamente confiable.

1.1. Definiciones

El mensurando del cual se ha hecho referencia, es el contenido de humedad en madera (*moisture* en inglés), y se define, de acuerdo con la recomendación internacional OIML R 92 [1], y la norma estadounidense ASTM D 4442 [2], como: la relación entre la masa de agua contenida en una muestra de madera y la masa de la misma muestra en estado de secado al horno; se expresa en porcentaje (%H₂O).

Es conveniente no confundir el mensurando contenido de humedad en madera, con la humedad relativa del aire (*humidity* en inglés), la cual se define de acuerdo con la recomendación internacional OIML R 121 [3], como: la humedad relativa, con respecto a agua en aire húmedo a una presión p y temperatura t , es la relación (expresada en porcentaje, %HR) de la fracción molar de vapor de agua x_v con respecto a la fracción molar de vapor de agua x_{vw} que el aire podría contener si estuviera

saturado con respecto a agua a la misma presión p y temperatura t . Una definición más comúnmente utilizada la encontramos en la norma internacional IEC 60068-3-6 [4], la cual nos dice que la humedad relativa (HR) es la relación de la presión parcial de vapor e' , dividida por la presión de saturación de vapor e'_w de un volumen dado de aire a temperatura constante t , expresada en porcentaje, el método más popular para expresar el contenido de vapor de agua en aire es la humedad relativa.

2. APLICACIONES DE LA MEDICIÓN Y CONTROL DE HUMEDAD EN MADERAS

La madera es un material higroscópico, siempre contiene agua, cuando la madera está “verde” o recién cortada la savia corre por sus fibras y puede contener valores muy altos de agua-savia, desde 60 %H₂O hasta 130 %H₂O en maderas duras y el doble en maderas muy porosas o suaves [5], esto significa que la madera puede pesar más por su contenido de agua absorbida que por el peso de sus fibras.

Para su uso, la madera debe ser sometida a tratamientos de secado en horno, donde se espera reducir el contenido de humedad a valores cercanos al 20 %H₂O con respecto a su peso en seco, una vez que la madera ha sido secada, la humedad residual que se mantiene en ella dependerá del constante intercambio por difusión- evaporación de vapor de agua entre la madera y el aire, hasta lograr el equilibrio higrostático, considerando que el valor máximo de humedad que se puede contener en la madera seca es cuando se llega al punto de saturación de la fibra, en valores cercanos al 35 %H₂O.

El contenido de agua es el factor más importante que afecta la calidad de la madera seca. Un medidor del contenido de humedad en madera es la manera segura de ayudar a reducir al mínimo problemas causados por el contenido de humedad, problemas como: deformación, cambio dimensional, grietas, crecimiento de hongos y apariencia, en aplicaciones como [6]: la construcción de casas, preparación de materiales de madera para la fabricación de muebles, control de calidad de productos de la madera, control dimensional de construcciones y estructuras de madera, almacenamiento y transportación de productos empacados o estibados en cajas o tarimas de madera, prevenir crecimiento de hongos y lama en la madera. El control del contenido de humedad en madera utilizando un higrómetro bajo confirmación metrológica puede asegurar que la madera

mantendrá estabilidad dimensional y que no ocurrirán defectos costosos.

Todas las maderas pierden o ganan humedad en un intento de alcanzar un estado de equilibrio o balance con las condiciones del ambiente, este estado de equilibrio depende de la humedad relativa (HR) y la temperatura del ambiente.

La cantidad de humedad en este punto de balance es llamado contenido de humedad en equilibrio (EMC, por sus siglas en inglés de Equilibrium Moisture Content). Si la humedad relativa del aire se incrementa, el contenido de humedad en equilibrio también incrementa, es decir más humedad es retenida en la madera. La tabla 1 muestra como afecta la humedad relativa al contenido de humedad en equilibrio [6].

Contenido de humedad en equilibrio en %H ₂ O a diferentes valores de humedad relativa en %HR a una temperatura de 21 °C									
HR	10	20	30	40	50	60	70	80	90
EMC	2,5	4,5	6,2	7,7	9,2	11,0	13,1	16,0	20,5

Tabla 1 Contenido de humedad en equilibrio a diferentes valores de humedad relativa

La cantidad de humedad en madera puede expresarse en porcentaje de peso húmedo o seco. Para muchos propósitos el contenido de humedad en madera esta basado en peso seco, tal como se utiliza en este trabajo.

El peso, la contracción, la resistencia mecánica, coeficiente de fricción, el aislamiento térmico, el aislamiento eléctrico, y otras características físicas y mecánicas de la madera [6], dependen del contenido de agua en la madera.

3. HIGRÓMETROS PARA MADERA

Las propiedades eléctricas de la madera varían con el contenido de humedad. Estas propiedades eléctricas son [7]: a) conductancia iónica entre puntos donde se aplica tensión, usualmente corriente continua, la conductancia a la corriente continua es comúnmente referida como resistencia eléctrica, y b) propiedades dieléctricas como pérdida de potencia y admitancia o capacitancia, que operan en el alcance de radio frecuencia (RF) de 1 a 10 MHz. Estas propiedades eléctricas de la madera y sus derivados, son utilizadas por los medidores eléctricos de contenido de humedad.

Otras de las características de la madera y sus derivados que pueden afectar las lecturas de los medidores eléctricos como variables de influencia son: la especie, la densidad, la distribución de la humedad, el grosor de la madera y la temperatura ambiente.

4.1. Higrómetros Resistivos

Su principio de operación se basa en que la madera seca es pobre conductora de electricidad. El agua, al absorberse en la madera y combinarse con las resinas propias de la madera, mejora su conductividad eléctrica, debido al flujo iónico al aplicar tensión en corriente continua a través de los electrodos, así la resistencia medida (o conductancia, la cual es inversa a la resistencia) a un flujo de la corriente a través de la madera es una medida de la cantidad de humedad en esa madera [8].

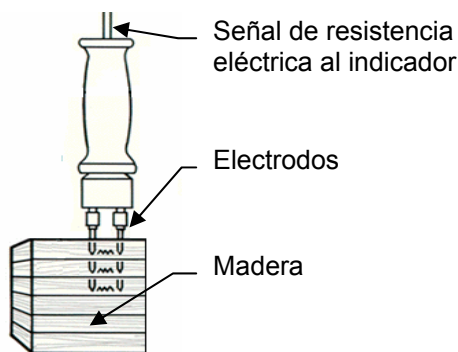


Fig. 1 Higrómetro resistivo

Un medidor de contenido de humedad de tipo resistivo (conductancia) difiere de un ohmetro ordinario, solamente en los inusuales altos valores de resistencia (baja conductancia) que van de 70 k Ω hasta 700 G Ω [9], los cuales deben ser medidos cuando se miden contenidos de humedad en madera bajos alrededor del 10 %H₂O.

Los electrodos son introducidos en la madera, la resistencia eléctrica o conductancia entre las puntas-electrodos es medida y convertida a lecturas de contenido de humedad. El alcance de medición para este tipo de medidores [6] es de 7 a 30 %H₂O, y su clase de exactitud esperada [8] va de $\pm 1,5$ a ± 3 %H₂O aunque otras referencias [7], [10], [11], indican que la exactitud de la medición se puede determinar de $\pm 0,5$ a ± 2 %H₂O.

La resistencia eléctrica de las maderas varía mucho con el contenido de humedad. Esta decreta considerablemente cuando el contenido de humedad incrementa, ver la figura 5. La resistencia también varía con las especies y es afectada por la temperatura más no por la densidad específica.

4.2. Higrómetros Capacitivos

Los medidores que utilizan las propiedades dieléctricas de la madera son los de tipo capacitivo. Estos instrumentos utilizan sensores planos que no penetran físicamente a la madera. Los electrodos son presionados a la madera y se aplica tensión de alta frecuencia (RF de 1 a 10 MHz) [6], [7].

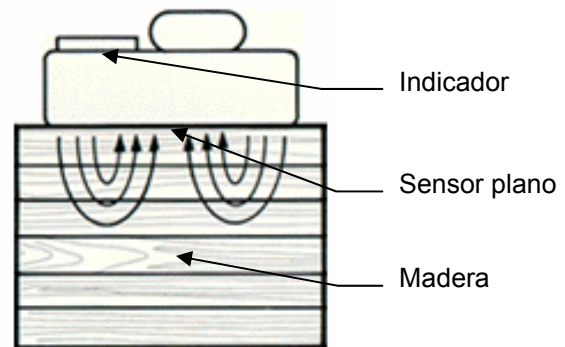


Fig. 2 Higrómetro capacitivo

La cantidad de energía absorbida depende del contenido de humedad en la madera y convertida a lecturas de contenido de humedad. El alcance efectivo de estos medidores es de 5 a 30 %H₂O [6], [7] y su clase de exactitud esperada va de ± 3 a ± 6 %H₂O [7], [8].

Cada especie de madera tiene su propia densidad específica. Por eso, solo para los higrómetros de tipo capacitivo se debe configurar el valor de densidad apropiado. En este tipo de medidores la temperatura apenas influye en la medición del contenido de humedad en equilibrio.

4. CALIBRACIÓN DE HIGRÓMETROS PARA MADERA

La cantidad de humedad en madera comúnmente es expresada como un porcentaje (%H₂O) del peso de la madera cuando esta seca. Existen varios métodos para medir o calcular la humedad contenida en la madera como son: el gravimétrico,

equilibrio en sales saturadas y simulación eléctrica de resistencia.

4.1. Método gravimétrico

Con este método se determina el contenido de humedad de una muestra de madera. Implica el peso de la muestra antes y después de secarla en el horno a una temperatura mayor a 100 °C.

La fórmula para la determinación del contenido de humedad W , según el método gravimétrico está definida como [1], [6], [8], [10], [11], [12]:

$$W = \frac{(m_W - m_o)}{m_o} \cdot 100 \quad (1)$$

Donde m_W es la masa en gramos de la muestra en estado húmedo y m_o es la masa en gramos, de la muestra en estado seco.

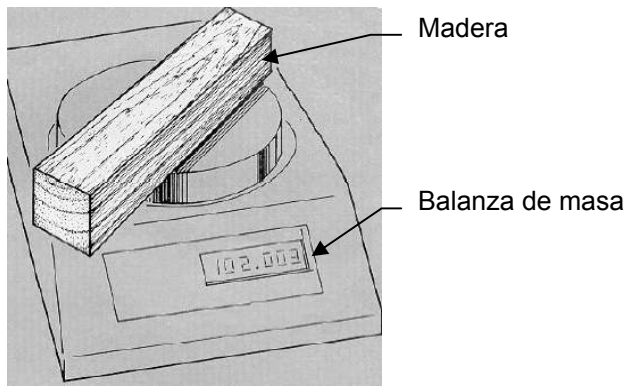


Fig. 3 Medición de masa por método gravimétrico

El estado seco es definido cuando la muestra de la madera ha sido secada en un horno a 103 °C ±2 °C con tal duración que repetidos pesajes de la muestra, en intervalos de 6 horas, muestre una máxima diferencia de solo el 0,5 % entre la medición actual y la anterior [10], [11], [12].

El método gravimétrico es ampliamente utilizado por diferentes organismos de normalización [1], [2], [6], [7], [10], [12], [13] para determinar el contenido de humedad en maderas y reconocido como un método primario [1], [2].

La repetibilidad-reproducibilidad (indicada como precisión en ASTM D 4442 [2]) de este método depende principalmente de la resolución de la balanza de masa utilizada, ASTM D 4442 [2] nos dice que para una resolución de 1 mg la

repetibilidad-reproducibilidad esperada será de 0,01 %H₂O, para 10 mg de 0,1 %H₂O y para 100 mg de 1,0 %H₂O.

4.2. Equilibrio en sales saturadas

El equilibrio de la humedad en maderas está en función de la humedad relativa y la temperatura del aire. Al utilizar el método de puntos fijos de sales saturadas, se obtiene la estabilidad en la humedad relativa.

El procedimiento de calibración de higrómetros de madera requiere de un bloque de madera de dimensiones adecuadas, como muestra de la especie de madera para la cual el higrómetro es utilizado [14]. La especie de madera más utilizada en México es el pino (*Pinus Oocarpa*).

Se acondicionan las muestras de madera con valores de humedad correspondientes a: extremo inferior, centro y extremo superior, del alcance de medición del higrómetro a calibrar, manteniendo las muestras individualmente en un higróstato sobre soluciones de sales saturadas a temperatura ambiente durante 15 días [1].

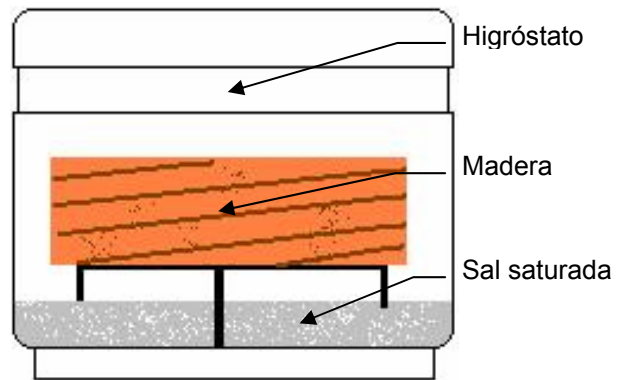


Fig. 4 Higróstato de equilibrio en madera por el método sales saturadas

La relación entre el contenido de humedad en equilibrio y la humedad relativa puede ser expresada [6] como:

$$EMC = \frac{1800}{M} \cdot \left[\frac{K \cdot h}{1 - K \cdot h} + \frac{K_1 \cdot K \cdot h + 2 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K^2 \cdot h^2}{1 + K_1 \cdot K \cdot h + K_1 \cdot K_2 \cdot K^2 \cdot h^2} \right] \quad (2)$$

Donde: h = humedad relativa del aire (%HR/100) y EMC = Contenido de humedad de la madera (%H₂O). Las variables M , K , K_1 y K_2 dependen de la

temperatura t de equilibrio entre el aire y la madera en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

$$M = 349 + 1,29 \cdot t + 0,0135 \cdot t^2 \quad (3)$$

$$K = 0,805 + 0,000736 \cdot t - 0,00000273 \cdot t^2 \quad (4)$$

$$K_1 = 6,27 - 0,00938 \cdot t - 0,000303 \cdot t^2 \quad (5)$$

$$K_2 = 1,91 + 0,0407 \cdot t - 0,000293 \cdot t^2 \quad (6)$$

Este método tiene una incertidumbre de $\pm 2,1 \text{ \%H}_2\text{O}$ en el contenido de humedad en la madera, definiendo el mensurando en base a las ecuaciones 2 a 6, para una incertidumbre en la humedad relativa del aire de $\pm 1,6 \text{ \%HR}$ y una incertidumbre en la temperatura del conjunto madera-aire de $\pm 1,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [14].

El método de equilibrio en sales saturadas tiene diferentes aplicaciones: a) puede utilizarse tanto como método de calibración y verificación, b) preparación de muestras a diferentes contenidos de humedad en equilibrio para el método gravimétrico.

Este método, lo podemos encontrar descrito o indicado en diferentes normas y recomendaciones internacionales como: OIML R 92 [1] de la Organización Internacional de Metrología Legal, ISO 3130 [12] de la Organización Internacional de Normalización; y normas y proyectos regionales o extranjeros como: ASTM D 2016 [13], ASTM D 4442 [2] y ASTM D 4444 [7] de la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales, FPL-GTR-6 [9] y FPL-GTR-113 [6] del Laboratorio de Productos Forestales del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, NT BUILD 302 [10] y NT BUILD 420 [11] de Nordtest Centro Nórdico de Innovación y PN01.1306 [8] de la Corporación para la Investigación y Desarrollo de Productos Forestales y Madera del gobierno australiano entre otras más.

4.3. Simulación eléctrica

El método de simulación eléctrica se aplica exclusivamente para higrómetros del tipo resistivo, siendo un método muy práctico por su fácil implementación y confiable dado que existen diferentes referencias [6], [8], [9] que han estudiado y caracterizado la relación entre la resistencia y el contenido de humedad para diferentes especies de madera.

El método de simulación eléctrica está basado en simular una resistencia eléctrica entre los electrodos del higrómetro de madera de tipo resistivo, para lo cual se utiliza una década de resistencia patrón.

Para la realización de la calibración se utilizan los valores de resistencia contra contenido de humedad publicados por las normas o recomendaciones citadas en el método de equilibrio en sales saturadas, por ejemplo, para la madera de pino se indica su relación de resistencia contra contenido de humedad [9] en la tabla 2 y en la gráfica de la Fig. 5.

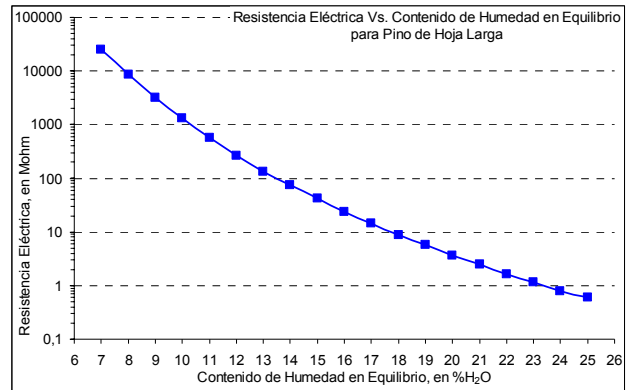


Fig. 5 Resistencia eléctrica Vs. contenido de humedad en madera por el método de simulación eléctrica

Resistencia eléctrica en MΩ Vs. Contenido de humedad en equilibrio en %H ₂ O Para pino de hoja larga a una temperatura de 27 °C Electrodo: Distancia 32 mm y profundidad 8 mm										
MΩ	25 000	3 160	575	135	41,7	14,4	5,76	2,46	1,15	0,60
EMC	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25

Tabla 2 Relación de resistencia eléctrica contra contenido de humedad en equilibrio

La recomendación internacional OIML R 92 [1] indica que se requiere calibrar un punto cada 10 % del alcance de medición (10, 20, 30 ... 100 %) determinando los límites de variación de resistencia mínima y máxima para cada punto de calibración.

La incertidumbre al calibrar con este método va de $\pm 1,5 \text{ \%H}_2\text{O}$ a $\pm 3,0 \text{ \%H}_2\text{O}$ [8], esta incertidumbre depende principalmente de la regresión de ajuste que establece la relación entre la resistencia y el contenido de humedad en madera para cada especie.

5. TRAZABILIDAD

La trazabilidad para el método gravimétrico se obtiene mediante la calibración de una balanza con un marco de pesas que a su vez tiene trazabilidad hacia el patrón nacional de masa. El patrón nacional de masa es trazable directamente al patrón internacional.

El método de equilibrio con sales saturadas es trazable mediante un higrotermómetro digital como patrón de transferencia entre los puntos fijos de sales saturadas y el patrón nacional de humedad [15], un generador de humedad por principio de dos presiones, este a su vez obtiene su trazabilidad al patrón nacional de temperatura y al patrón nacional de baja presión.

Para el método de simulación eléctrica la trazabilidad se obtiene mediante la calibración del higrómetro resistivo con décadas de resistencia, las cuales deben ser calibradas en laboratorios de metrología eléctrica con multímetros de alta exactitud y u o puentes resistivos; estos patrones son calibrados a su vez directamente en el laboratorio nacional [15], el cual mantiene un juego de resistores patrón con trazabilidad a patrones primarios de resistencia mediante el efecto Hall

Cuántico [16], que permite reproducir la magnitud resistencia eléctrica en c.c. en base a constantes físicas fundamentales, como la constante de Plank (h) y la carga del electrón (e); como se muestra en la carta de trazabilidad de la figura 6.

Según la norma internacional ISO/IEC 17025 [17] en el requisito 5.6.2.1.2 referente a trazabilidad nos dice que: existen ciertas calibraciones que actualmente no pueden ser hechas estrictamente en unidades del SI. En estos casos la calibración debe proveer confianza en las mediciones estableciendo su trazabilidad a los patrones de medición adecuados, tales como:

- Uso de materiales de referencia certificados proporcionados por un proveedor competente para dar una caracterización confiable física o química de un material;
- Uso de métodos especificados y u o patrones de consenso que sean claramente descritos y acordados por todas las partes concernientes.

Cuando sea posible se requiere la participación en un programa adecuado de comparaciones entre laboratorios.

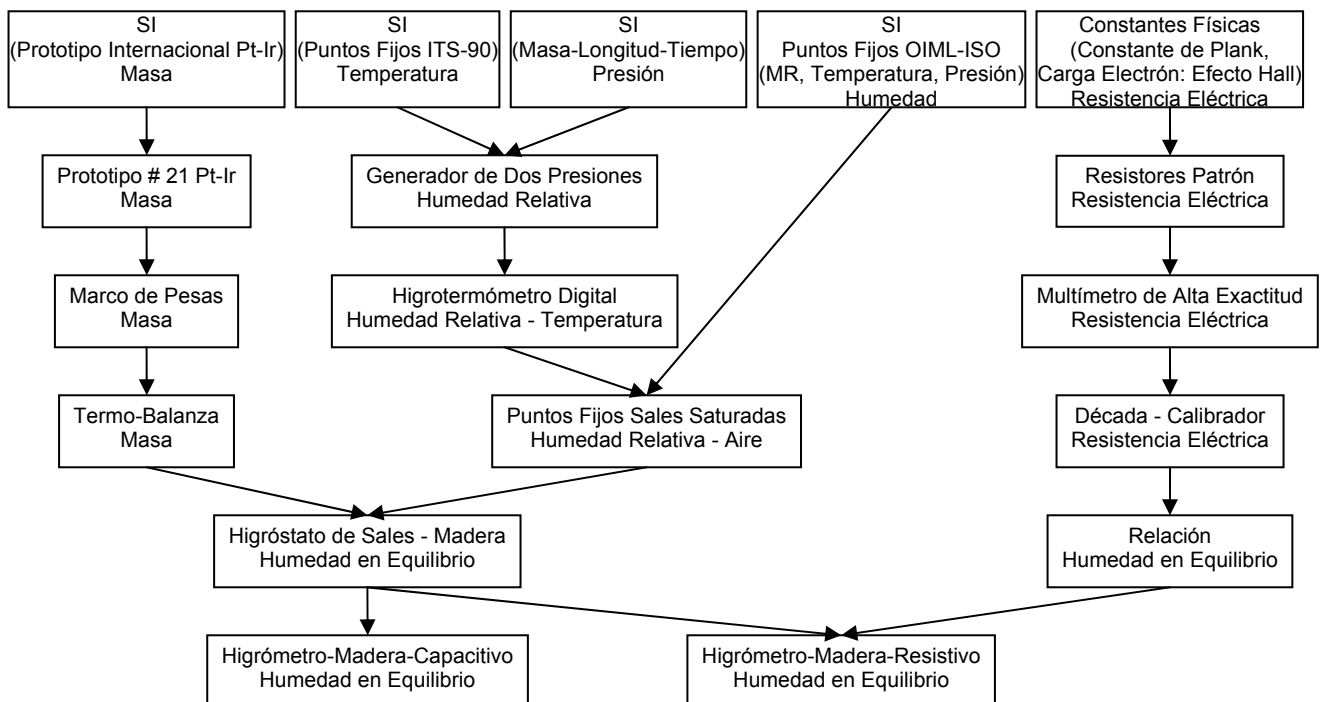


Fig. 6 Trazabilidad para la medición de humedad en madera

6. VALIDACIÓN DEL MÉTODO

Dada la carta de trazabilidad y los métodos normalizados en normas y recomendaciones internacionales y extranjeras que se han presentado, podemos considerar que la calibración de higrómetros para madera por los métodos: gravimétrico, equilibrio en sales saturadas y simulación eléctrica, pueden considerarse como métodos normalizados de acuerdo con ISO 17025 [17].

En MetAs [14] se ha optado por utilizar: a) los puntos fijos de sales saturadas, los cuales representan constantes físicas termodinámicas, llevando a cabo su reproducción en base a métodos especificados en recomendaciones internacionales como la OIML R 92 [1], y b) adicionalmente el método de simulación eléctrica para complementar la calibración de higrómetros resistivos, método que también es considerado por la OIML R 92 [1].

Con el propósito de complementar el procedimiento que MetAs sigue para desarrollar el método de equilibrio en sales, se han utilizado las siguientes técnicas recomendadas por ISO/IEC 17025 [17] en el requisito 5.4.5 para determinar el desempeño del servicio: a) calibración usando patrones de referencia o materiales de referencia (MR) como se indica en la carta de trazabilidad de la figura 6, b) comparación de resultados con otros métodos, al implementar tanto el método de equilibrio en sales como el de simulación eléctrica, c) evaluando sistemáticamente las magnitudes de influencia relacionadas con la humedad en equilibrio como son, al menos: humedad relativa, temperatura, muestras de madera, especie de madera, generador de resistencia eléctrica, d) y la evaluación de incertidumbre en base a las ecuaciones 2 a 6 [6], que representan la relación del contenido de humedad en equilibrio con la humedad relativa y la temperatura.

La opción para validación de métodos referente a la comparación entre laboratorios no se ha realizado dados los aspectos logísticos y económicos para efectuar una comparación con laboratorios de calibración reconocidos en el extranjero, dado que actualmente en el país no hay laboratorios acreditados en la magnitud de contenido de humedad en madera.

En MetAs se desarrolla actualmente el laboratorio de calibración de masas, con lo cual podremos en corto plazo realizar la trazabilidad hacia el patrón

nacional de masas, utilizando en su oportunidad el método gravimétrico para la calibración de higrómetros de madera.

REFERENCIAS

- [1] OIML R 92, Wood-moisture meters – Verification methods and equipment: general provisions, OIML Organisation Internationale de Métrologie Légale, 1989.
- [2] ASTM D 4442, Direct moisture content measurement of wood and wood-based materials, ASTM American Society for Testing and Materials, 1992.
- [3] OIML R 121, The scale of relative humidity of air certified against saturated salt solutions, OIML Organisation Internationale de Métrologie Légale, 1996.
- [4] IEC 60068-3-6, Environmental testing – Part 3-6: Supporting documentation and guidance – Confirmation of the performance of temperature /humidity chambers, IEC International Electrotechnical Commission, 2001.
- [5] Reeb, J. E., Wood and moisture relationships, EM 8600, Oregon State University Extension Service, 1995.
- [6] FPL-GTR-113, Wood handbook – Wood as an engineering material, USDA U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Chapters 3 & 12, 1999.
- [7] ASTM D 4444, Use and calibration of handheld moisture meters, ASTM American Society for Testing and Materials, 1984.
- [8] PN01.1306, Project: The use of hand-held electrical moisture meters with commercially important Australian hardwoods, Part 1, Australian Government – Forest and wood products research and development corporation – CSIRO Forestry and forest products, 2003.
- [9] James, W. L. Electric moisture meters for wood, FPL-GTR-6, USDA U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1988.
- [10] NT BUILD 302, Building materials, wood: moisture content, NORDTEST method, Nordic Innovation Centre, 1986.
- [11] NT BUILD 420, Building materials, wood: moisture content, NORDTEST method, Nordic Innovation Centre, 1993.
- [12] ISO 3130, Wood – Determination of moisture content for physical and mechanical test, ISO International Organization for Standardization.
- [13] ASTM D 2016, Methods of measuring

- moisture content of wood, ASTM American Society for Testing and Materials, 1968.
- [14] Medrano, S. Procedimiento: Calibración de higrómetros para madera, MA-TEM05-01/02, MetAs & Metrólogos Asociados, 2002.
 - [15] CENAM, Patrones nacionales, Centro Nacional de Metrología, www.cenam.mx, 2004-junio.
 - [16] FLUKE, Calibration: Philosophy in practice, second edition, Fluke Corporation, 1994.
 - [17] ISO/IEC 17025, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, ISO International Organization for Standardization, IEC International Electrotechnical Commission, 1999.