



CLASIFICACIÓN DE LA NEUTRALIDAD MAGNÉTICA DE LA MADERA ESTRUCTURAL: UNA CLASIFICACIÓN DE PUREZA POR GRADOS N PARA MATERIALES DE SOPORTE DE AUDIO, CON CARACTERIZACIÓN PARAMAGNÉTICA DE TRAZAS EN TECA ECUATORIAL

Clasificación de la neutralidad magnética de la madera estructural: una clasificación de pureza por grados N para materiales de soporte de audio, con caracterización paramagnética de trazas en teca ecuatorial

A. Bosque, M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Resumen

Los conductores de audio se especifican habitualmente según grados de pureza metalúrgica -- 4N (99,99 %), 6N (99,9999 %) y superiores --, pero los materiales estructurales que sostienen, elevan y terminan esos conductores se especifican, si acaso, por su aspecto. Esta asimetría carece de justificación: un material de soporte en contacto continuo con un cable de señal participa en el entorno electromagnético de campo cercano del cable; por tanto, sus propiedades magnéticas y dieléctricas son parámetros medibles de la instalación, no decorativos. Proponemos una clasificación de pureza por grados N para la madera estructural, análoga a la escala N de los metales pero definida sobre la magnitud relevante para un no conductor: el contenido paramagnético residual. El grado de una madera queda fijado por su susceptibilidad magnética volumétrica y, de forma equivalente, por la fracción de masa combinada de los contaminantes paramagnéticos dominantes, hierro y manganeso, determinada mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente tras digestión ácida por microondas. Caracterizamos 11 especies candidatas y demostramos que la mayoría de las frondosas de mobiliario -- en particular el roble blanco, con entre 41 y 190 ppm de hierro -- quedan por debajo de la neutralidad 4N, mientras que la teca de plantación (*Tectona grandis*) cultivada a menos de 5 deg del ecuador geomagnético alcanza 5N (99,999 % magnéticamente neutra, Fe + Mn <= 10 ppm) tal como se entrega y 6N mediante selección de una sola troza. Presentamos la instrumentación, los límites de grado, las consecuencias dieléctricas de la orientación de la fibra y del contenido de humedad, y la reclasificación de madera neutra como «magnéticamente comprometida» que sigue a la aplicación de cualquier acabado catalizado por metales.

1. INTRODUCCIÓN

El mercado de conductores audiófilos está organizado en torno a la pureza. El cobre libre de oxígeno se vende como 4N (99,99 %), 5N, 6N y -- en el límite de lo que puede ofrecer el refinado electrolítico -- 7N. Se entiende que cada nueve adicional elimina un centro de dispersión, una impureza de límite de grano, una inclusión paramagnética. Si el beneficio audible del último nueve sobrevive a una prueba de escucha controlada es otra cuestión, tratada en otro lugar de esta revista; aquí importa que la industria posea un vocabulario riguroso, cuantitativo y universalmente entendido para la pureza de un conductor.

No posee tal vocabulario para nada más. El cable se clasifica con siete nueves y después se deja en el suelo, se sujeta a una pared o se apoya en un soporte de composición totalmente desconocida. El soporte se elige por su color. Esta es la posición de la madera en un sistema de audio: soporta carga estructural, mantiene contacto físico continuo con el conductor de señal y resulta invisible para la metrología.

Consideramos indefendible esta situación. Un material de soporte en contacto con un cable forma parte de su entorno dieléctrico y magnético inmediato. Si contiene inclusiones ferromagnéticas -- un fragmento de viruta de sierra de cinta, una grapa rota, el hierro que un árbol extrajo del suelo y fijó en su duramen -- presenta una discontinuidad local de permeabilidad a lo largo del tendido. Si es higroscópico y polar, presenta una capacitancia distribuida dependiente de la humedad. Son las mismas magnitudes que el grado de pureza del propio conductor pretende controlar. Es incoherente especificar uno con seis nueves y dejar el otro al ebanista.

Este artículo propone una clasificación por grados N para la madera estructural, definida no sobre la pureza química global -- la madera contiene aproximadamente la mitad de carbono y nunca será «99,999 % madera» en ningún sentido útil --, sino sobre la única propiedad que acopla la madera a una ruta de señal de audio: su contenido paramagnético residual y la susceptibilidad magnética volumétrica que este produce.

2. EL GRADO DE NEUTRALIDAD Y LA ESCALA N

La madera seca es diamagnética. La celulosa, la lignina y el agua ligada presentan una pequeña susceptibilidad magnética volumétrica negativa, y una madera limpia y sin contaminantes se sitúa cerca de $\chi_v = -6 \times 10^{-6}$ (SI, susceptibilidad volumétrica adimensional), correspondiente a una permeabilidad relativa μ_r de 0.999994 -- indistinguible de la unidad y, de hecho, ligeramente inferior. Una madera perfectamente neutra no es meramente no magnética; es débil y reproduciblemente diamagnética, la condición correcta y deseable para un material que debe permanecer en un campo estático o cuasiestático sin perturbarlo.

Las desviaciones de esta línea base son obra casi exclusiva de contaminantes paramagnéticos de metales de transición, entre los que domina el hierro y el manganeso ocupa un segundo puesto lejano. Un árbol es una bomba de minerales: extrae iones metálicos del agua del suelo y los deposita de forma desigual en sus tejidos. El contenido de hierro resultante varía desde unas



pocas partes por millón en una frondosa de plantación limpia hasta cientos de partes por millón en especies cuyas químicas tánicas quelan activamente el hierro. Cada parte por millón de hierro añade un pequeño incremento positivo a la susceptibilidad y arrastra la madera desde su suelo diamagnético hacia la neutralidad magnética y, en las peores especies, más allá de ella.

Por tanto, definimos el grado de neutralidad de la madera sobre la fracción de masa combinada de hierro y manganeso y, de forma equivalente, sobre la desviación medida de la susceptibilidad volumétrica respecto de la línea base diamagnética:

- 4N (99,99 % neutra): $\text{Fe} + \text{Mn} \leq 100$ ppm. Típica de frondosa de mobiliario sin seleccionar.
- 5N (99,999 % neutra): $\text{Fe} + \text{Mn} \leq 10$ ppm; susceptibilidad residual dentro de $\pm 1 \times 10^{-6}$ respecto de la línea base diamagnética. Especificación de entrega de Equatorial Audio.
- 6N (99,9999 % neutra): $\text{Fe} + \text{Mn} \leq 1$ ppm; susceptibilidad neta aún diamagnética dentro de la incertidumbre de medida. Alcanzable mediante selección de una sola troza.
- 7N: $\text{Fe} + \text{Mn} \leq 0.1$ ppm. Registrada aquí en dos trozas de teca de las 340 examinadas. No es un grado de producción.

Reconocemos que los porcentajes son un préstamo retórico de la convención de los metales, no una cifra de composición global; «99,999 % neutra» denota 10 ppm del contaminante relevante, no 10 ppm de materia que no sea madera. Conservamos la notación porque el lector ya razona con ella y porque la magnitud subyacente -- partes por millón paramagnéticas -- se mide de la misma manera que un refinador de cobre mide las impurezas de un cátodo.

3. INSTRUMENTACIÓN Y MÉTODO

Clasificar una troza exige tres mediciones magnéticas y químicas independientes -- una exploración de inclusiones ferrosas, una determinación de susceptibilidad global y un ensayo de metales traza --, además de una caracterización dieléctrica para modelar la instalación.

Exploración de inclusiones ferrosas. Cada troza atraviesa una matriz de gradiómetros fluxgate (Bartington Grad-13, tres ejes, resolución de 1 nT) sobre una bancada motorizada a 20 mm/s. El gradiómetro resuelve inclusiones ferromagnéticas discretas -- clavos incrustados, perdigones, viruta de sierra de cinta, los contaminantes comunes de cualquier madera que haya pasado por maquinaria industrial -- hasta fragmentos submilimétricos a 30 mm de profundidad. La madera recuperada y de salvamento falla habitualmente esta exploración; es la razón principal por la que los Bloques de Elevación Equatoriales se mecanizan en madera de plantación de primera pasada y nunca en madera recuperada, por romántica que sea su procedencia.

Susceptibilidad global. Se extrae un testigo de 12 mm de cada troza aceptada y se mide en un magnetómetro de muestra vibrante (Lake Shore 8600, sensibilidad de 5×10^{-8} emu) a 300 K. El VSM devuelve la susceptibilidad volumétrica neta, de la que se lee directamente el criterio magnético del grado. Un testigo de teca limpia da negativo; uno de roble da positivo con frecuencia.

Ensayo de metales traza. El testigo medido se criomuele, se digiere por microondas en ácido nítrico más fluorhídrico y se analiza mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) para Fe, Mn, Ni, Co y Cr. Es el mismo protocolo dendroquímico utilizado para reconstruir historiales de contaminación a partir de anillos de crecimiento, aplicado aquí a un fin que, admitimos, sus creadores no anticiparon. La cifra $\text{Fe} + \text{Mn}$ fija el criterio químico del grado; los criterios magnético y químico deben concordar dentro de la banda del grado o la troza se rechaza por incoherencia interna, normalmente indicio de una inclusión que el gradiómetro no detectó.

Caracterización dieléctrica. Para modelar la instalación medimos la permitividad relativa y la tangente de pérdidas en probetas mecanizadas mediante una celda de placas paralelas con guarda y un analizador de impedancias (Keysight E4990A), de 20 Hz a 10 MHz, a favor y a través de la fibra, acondicionadas a contenidos de humedad del 8, 12 y 16 %. Estas cifras no forman parte del grado de neutralidad -- un dieléctrico no es un contaminante magnético --, pero gobiernan la capacitancia distribuida que el soporte terminado presenta al cable y figuran junto al grado en el certificado de cada unidad.

4. RESULTADOS: COMPARACIÓN DE ESPECIES

Se examinaron once especies con $n = 20$ trozas de cada una. Los resultados se separan claramente en tres bandas.

Los fallos. El roble blanco (*Quercus alba*) fue el peor, con 41 a 190 ppm de hierro y una susceptibilidad neta positiva en 14 de 20 trozas. La causa es conocida para cualquiera que haya dejado un sargento de acero sobre roble húmedo durante una noche: el alto contenido tánico del roble quela hierro en forma de tanato de hierro -- el compuesto negro azulado de la tinta ferrogáfica --, por lo que el roble concentra activamente el mismo contaminante que penaliza este grado. El roble es una madera hermosa y magnéticamente hostil. El nogal y el cerezo se comportaron mejor, pero aun así promediaron 4N o menos.

Las gramíneas y los compuestos. El bambú, comercializado a menudo como «madera» sostenible, es una gramínea con gran carga de sílice y química nodal errática; su susceptibilidad estaba dominada por inclusiones minerales a escala de grano y no se le pudo asignar un grado estable. El tablero de fibra de densidad media (MDF) falló en otro eje: su aglutinante de urea-formaldehído es muy polar, le confiere una permitividad relativa de 4 a 6 y una tangente de pérdidas un orden de magnitud superior a la madera maciza, y su fabricación lo hace propenso a finos metálicos incrustados. El MDF queda descalificado como material de soporte por



motivos dieléctricos antes siquiera de considerar su grado magnético.

El resultado de la teca. La teca de plantación (*Tectona grandis*) cultivada a menos de 5 deg del ecuador geomagnético devolvió entre 3 y 9 ppm Fe + Mn en 20 trozas, una susceptibilidad diamagnética neta en todas las muestras y grado 5N tal como se entrega. Mediante selección VSM más ICP-MS de trozas individuales, 31 de las 340 examinadas alcanzaron 6N y dos alcanzaron 7N. La ventaja de la teca ecuatorial no es mística: crece rápido en suelos de plantación gestionados, lixiviados y pobres en hierro; se tala joven antes de la acumulación mineral profunda del duramen; y carece de la química tanino-hierro que penaliza al roble. Su constante dieléctrica de 2.1 al 12 % de humedad es la menor de las especies ensayadas y se aproxima a la de las espumas técnicas usadas en utillaje RF.

5. EL PROBLEMA DEL ACABADO

El grado de una madera es propiedad de la madera, no del objeto en que se convierte, y la forma más común de destruir un buen grado es aplicar un acabado.

Casi todos los acabados de aceite, barniz y laca curan con secantes metálicos: sales de cobalto, manganeso y circonio de ácido nafténico o 2-etilhexanoico, añadidas en una fracción porcentual para catalizar la reticulación oxidativa que endurece la película. El cobalto y el manganeso son paramagnéticos, y una carga de secante de apenas 0,05 % de metal deposita por metro cuadrado de superficie terminada más masa paramagnética que toda la troza 5N subyacente. Medimos una probeta de teca 5N antes y después de una sola capa de un acabado convencional de aceite de linaza cocido: su susceptibilidad referida a la superficie pasó de la línea base diamagnética a un valor neto positivo, reclasificando la probeta de 5N a menos de 4N. La madera no cambió. El acabado repuso la contaminación y la situó precisamente en la superficie, en contacto directo con el cable, el peor lugar posible.

Esta es la base medida -- no una preferencia estética -- para suministrar los Bloques de Elevación Equatoriales sin acabado. Un acabado desharía, en el último paso y en la ubicación magnéticamente más activa, todo el proceso de selección que otorgó su grado a la troza. La pátina gris plateada que desarrolla la teca sin acabado con los años es oxidación elemental de la propia superficie de la madera; no añade metal paramagnético y es un cambio cosmético sin suceso magnético alguno.

6. ANISOTROPÍA DE LA FIBRA Y RUTA DE CARGA DIELECTRICA

La madera es dieléctricamente anisótropa. En nuestras probetas de teca, la permitividad relativa a favor de la fibra superó entre un 22 y un 28 % la transversal al 12 % de contenido de humedad, y la tangente de pérdidas siguió el mismo eje. La causa física es la estructura celular tubular alineada y la orientación de los dipolos de agua ligada a lo largo de la fibra. Para un material de soporte, esta anisotropía no es una molestia que deba promediarse, sino una variable de diseño.

El cable reposa en una cuna mecanizada en la parte superior de cada bloque, por lo que el acoplamiento capacitivo dominante entre cable y soporte atraviesa la corta columna vertical de madera situada justo debajo. Al mecanizar cada bloque con la testa vertical -- anillos de crecimiento visibles en la cara superior y fibras verticales a lo largo de la ruta de carga -- orientamos el eje transversal de menor permitividad en el plano horizontal donde el campo del cable es más intenso y reservamos el eje longitudinal de mayor permitividad para la dirección vertical portante, donde no hace daño eléctrico y sí mucho bien mecánico. La orientación de testa se adoptó originalmente por su rigidez a compresión; el argumento dieléctrico surgió después de estas mediciones y confirma de forma independiente la elección.

El contenido de humedad gobierna todo el cuadro. Tanto la permitividad como la tangente de pérdidas crecen con rapidez con el agua ligada; por eso cada troza clasificada se seca en horno en origen hasta 12 +/- 1 % y el programa de mantenimiento exige una comprobación anual de humedad. Un soporte que haya absorbido humedad del 12 al 18 % ha alterado su contribución dieléctrica más de lo que lo haría cualquier diferencia entre especies.

7. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

La escala N propuesta aquí parasita deliberadamente una convención en la que el lector ya confía. Un audiófilo dispuesto a pagar por el sexto nueve de un conductor de cobre ya ha aceptado la premisa de que merece la pena controlar la contaminación paramagnética residual y de dispersión, medida en partes por millón. No hemos hecho más que aplicar esa premisa, y la misma clase de medición, al material sobre el que descansa el conductor; hemos descubierto que el hábito de la industria de clasificar el metal con seis nueves mientras lo apoya sobre frondosa sin clasificar, portadora de hierro y activa en taninos, es una asimetría que no sobrevive a ser enunciada en voz alta.

La teca de plantación ecuatorial alcanza neutralidad 5N tal como se entrega y 6N mediante selección, por razones completamente prosaicas: condiciones de crecimiento pobres en hierro, tala joven, ausencia de química tanino-hierro, poca resina y la línea base diamagnética que comparte con toda madera limpia. No es un material mágico. Es un material limpio, medido, clasificado y dejado sin acabado para que siga así. Cada Bloque de Elevación Equatorial se entrega con el grado de su troza, su cifra Fe + Mn y su susceptibilidad medida impresos en el certificado. Invitamos al lector a pedir cifras equivalentes a cualquier otro fabricante de soportes de audio y tomar nota de la respuesta.



REFERENCIAS

- [1] James, W. L. (1975). Propiedades dieléctricas de la madera y los tableros duros: variación con temperatura, frecuencia, contenido de humedad y orientación de la fibra. USDA Forest Service Research Paper FPL-245, Forest Products Laboratory, Madison.
- [2] Torgovnikov, G. I. (1993). Propiedades dieléctricas de la madera y de los materiales derivados de la madera. Springer-Verlag, Berlín.
- [3] Skaar, C. (1988). Relaciones entre madera y agua. Springer Series in Wood Science, Springer-Verlag, Berlín.
- [4] Cutter, B. E., Guyette, R. P. (1993). Factores anatómicos, químicos y ecológicos que afectan al uso de la madera en dendroquímica. Journal of Environmental Quality, 22(3), 611-619.
- [5] Bosque, A., Ferro, M., Park, H. (2026). Clasificación de la neutralidad magnética de la madera estructural: instrumentación y límites de grado. Journal of Equatorial Audio Science, 7(2), 44-71.
- [6] Tanaka, Y., Park, H. (2022). Medición de permitividad mediante placas paralelas con guarda en sólidos anisótropos de bajas pérdidas. Journal of Equatorial Audio Science, 3(1), 12-29.