



ANISOTROPÍA DIELECTRICA Y ARGUMENTOS A FAVOR DE LA TESTA: ORIENTACIÓN DE LA RUTA DE CARGA CAPACITIVA EN SOPORTES DE CABLE DE MADERA MAGNÉTICAMENTE NEUTRA



Anisotropía dieléctrica y argumentos a favor de la testa: orientación de la ruta de carga capacitiva en soportes de cable de madera magnéticamente neutra

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

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Resumen

Un soporte de cable de madera es un cuerpo dieléctrico mantenido en el campo cercano de un conductor de señal, por lo que su contribución a la instalación es una capacitancia distribuida, dependiente de la orientación y conectada en paralelo con el cable. En el estudio principal sobre la clasificación de neutralidad de la madera (Bosque, Ferro, Park y Tanaka, 2026), la orientación de la fibra se identificó como una variable de diseño y se adoptó el mecanizado con la testa en vertical a partir de un argumento mecánico y dieléctrico combinado, expuesto en una sola sección. Este artículo complementario desarrolla ese argumento por completo. La madera es dieléctricamente anisótropa: tanto la permitividad relativa ϵ_{rs} como la tangente de pérdidas $\tan \delta$ son mayores a favor de la fibra que a través de ella; el eje longitudinal supera a los dos ejes transversales porque la geometría celular tubular de las traqueidas y los vasos, así como los dipolos del agua ligada que dominan la polarización, están alineados con la fibra. Presentamos mediciones con analizador de impedancias y placas paralelas con guarda de ϵ_{rs} y $\tan \delta$ en teca ecuatorial a lo largo de los tres ejes anatómicos (longitudinal L, radial R y tangencial T), con contenidos de humedad de 8, 12 y 16 por ciento y entre 20 Hz y 10 MHz, que confirman una relación de anisotropía $\epsilon_{rL} / \epsilon_{rT}$ de 1.24 a 1.31 a frecuencias de audio y con un 12 por ciento de humedad. A partir de estas constantes construimos un modelo de capacitancia distribuida de un cable apoyado en una cuna mecanizada sobre una columna de madera y calculamos la contribución capacitiva por bloque del mecanizado con la testa en vertical frente al mecanizado por la cara: ambas orientaciones difieren en una magnitud medible, y la testa presenta la menor capacitancia referida al cable porque sitúa los ejes transversales de baja permitividad en el plano horizontal, donde el campo del cable es más intenso, y reserva el eje longitudinal de alta permitividad para la ruta de carga vertical, donde resulta eléctricamente inocuo y mecánicamente ideal. Un barrido del ángulo de la fibra sitúa el mínimo de acoplamiento en la testa verdadera. Cerramos señalando que la testa se especificó originalmente por su rigidez a compresión y que el argumento dieléctrico, obtenido de forma independiente y posterior, concuerda con el mecánico hasta el punto de confirmarlo.

1. INTRODUCCIÓN

Un soporte de cable no transporta la señal. Se encuentra a su lado. Precisamente por eso su función eléctrica se descarta con tanta facilidad: un bloque de madera colocado bajo un cable manifiestamente no está dentro del circuito, y resulta tentador concluir que su composición, su fibra y su orientación son asuntos del ebanista y no del ingeniero. El artículo principal sobre la clasificación de neutralidad (Bosque, Ferro, Park y Tanaka, 2026) expuso la mitad magnética del argumento: un soporte en contacto continuo con un conductor forma parte del entorno de campo cercano de ese conductor, y su contenido paramagnético residual es una entrada medible de la instalación, no una entrada decorativa. Despachó la mitad dieléctrica en una sola sección. Este artículo es aquella sección, ampliada hasta la extensión que merece la física.

El hecho eléctrico de que el bloque esté junto al cable y no dentro de él no lo elimina del circuito; determina la forma de su acoplamiento. Un cuerpo dieléctrico situado en el campo de un conductor almacena energía capacitivamente, y una capacitancia distribuida en paralelo con una línea de transmisión es una carga pequeña pero real, cuya magnitud depende de la permitividad del cuerpo y de la orientación de esa permitividad con respecto al campo. La madera no es un dieléctrico isótropo. Su permitividad depende de la dirección y, por tanto, un soporte de madera no tiene una sola contribución dieléctrica, sino tres, que pueden seleccionarse en el banco de mecanizado mediante el ángulo con el que se corta la troza.

La afirmación de este artículo es estrecha y cuantitativa. Sostenemos que la orientación con la testa en vertical especificada para el Bloque de Elevación Equatorial -- anillos de crecimiento en la cara superior y fibras que discurren verticalmente por la ruta de carga -- es la orientación que minimiza la capacitancia del bloque referida al cable, que el mínimo es medible y no meramente teórico y que coincide con la orientación elegida de antemano por razones mecánicas. No afirmamos que el efecto sea grande. Afirmamos que tiene un signo, una magnitud y una dirección preferida, y que el fabricante que mecaniza el bloque en sentido contrario para obtener una veta de cara más vistosa ha desplazado la cifra en la dirección equivocada sin saber siquiera que la cifra existe.

2. ANISOTROPÍA DIELECTRICA DE LA MADERA

La madera es un sólido celular formado por células largas, huecas y alineadas axialmente -- traqueidas en las coníferas, y fibras y vasos en frondosas como la teca -- cuyo eje largo define la fibra. Esta geometría origina la anisotropía mecánica que conoce todo trabajador de la madera, y origina igualmente una anisotropía dieléctrica menos conocida, pero igual de real y documentada desde hace mucho tiempo (James, 1975; Torgovnikov, 1993).

Tres mecanismos hacen que la permitividad dependa de la dirección, y los tres favorecen el eje longitudinal. En primer lugar, las propias paredes celulares forman rutas polarizables continuas a favor de la fibra y rutas interrumpidas a través de ella, de manera



que la polarización interfacial (Maxwell-Wagner) en los numerosos límites entre pared y lumen se acumula preferentemente a lo largo de la fibra. En segundo lugar, el agua ligada retenida en las paredes celulares -- el contribuyente dominante a la permitividad de la madera salvo en los estados más secos -- se encuentra en un entorno cuyos sitios de hidroxilo y cuyo armazón microfibrilar están a su vez alineados con la fibra, por lo que la polarización orientacional de los dipolos del agua ligada resulta más fácil a favor de la fibra que a través de ella. En tercer lugar, las dos direcciones transversales, radial R y tangencial T, solo difieren ligeramente entre sí, y ambas quedan muy por debajo del valor longitudinal L. El resultado, coherente en toda la bibliografía, es el orden $\epsilon_L > \epsilon_R \sim \epsilon_T$, con el mismo orden en la tangente de pérdidas y una relación de anisotropía ϵ_L / ϵ_T que suele encontrarse entre 1.2 y 1.5 para frondosas templadas y tropicales dentro del intervalo higroscópico.

Los valores absolutos son modestos y están dominados por la humedad. La madera anhidra se sitúa cerca de $\epsilon_r = 2$ a 3 y aumenta de forma pronunciada y monótona conforme crece el contenido de humedad, porque cada incremento de agua ligada añade dipolos al inventario polarizable. Esta pendiente pronunciada es la razón por la que el contenido de humedad, y no la especie, constituye la mayor palanca sobre la contribución dieléctrica de un soporte, y se aborda en la sección 5. Para el argumento de la anisotropía, el punto esencial es estructural y no numérico: la dirección de mayor permitividad es la dirección de la fibra, y esa dirección la fija quien trabaja la madera, no el árbol.

3. MEDICIÓN: PERMITIVIDAD Y PÉRDIDAS EN TRES EJES

Medimos ϵ_r y $\tan \delta$ en probetas de teca mecanizadas a lo largo de cada uno de los tres ejes anatómicos, de modo que el campo aplicado por la celda de placas paralelas atravesara la muestra, por turnos, en sentido longitudinal, radial y tangencial. Las probetas eran cuadrados de 40 mm y 3.0 mm de espesor, con las caras planas y paralelas dentro de ± 10 micrómetros, cortados de tres trozas ecuatoriales de grado 5N seleccionadas conforme al protocolo del estudio principal para que la contaminación magnética no pudiera confundir la lectura dieléctrica. Cada conjunto de probetas se acondicionó hasta alcanzar el equilibrio con tres contenidos de humedad -- 8, 12 y 16 por ciento -- en cámaras de humedad, y al final del ensayo se verificó gravimétricamente su humedad con respecto a la masa anhidra.

La celda era un dispositivo de placas paralelas con guarda del tipo descrito con anterioridad (Tanaka y Park, 2022), accionado por un analizador de impedancias Keysight E4990A entre 20 Hz y 10 MHz. El anillo de guarda suprime los campos de borde, de modo que la capacitancia medida corresponde a una superficie definida del electrodo y la permitividad extraída es el valor de volumen del material, no una estimación contaminada por los bordes; la tangente de pérdidas se lee directamente como factor de disipación del dispositivo. El contacto se realizó mediante finas intercapas de elastómero conductor que se adaptaban a la rugosidad superficial residual de las caras mecanizadas sin utilizar un adhesivo que aportara su propia polarización.

Con un contenido de humedad del 12 por ciento y a 1 kHz, la teca dio $\epsilon_L = 2.64$, $\epsilon_R = 2.09$ y $\epsilon_T = 2.02$, una relación de anisotropía ϵ_L / ϵ_T de 1.31 y ϵ_L / ϵ_R de 1.26; los dos ejes transversales concordaron dentro del 4 por ciento, como se esperaba. La tangente de pérdidas siguió el mismo orden: $\tan \delta$ fue 0.021 a favor de la fibra y de 0.014 a 0.015 a través de ella. En toda la banda de audio, entre 20 Hz y 20 kHz, las permitividades se mantuvieron planas dentro del 3 por ciento y la relación de anisotropía permaneció entre 1.24 y 1.31. Al elevar el contenido de humedad al 16 por ciento aumentaron todos los valores -- ϵ_L alcanzó 3.08 -- y, de forma notable, se ensanchó ligeramente la anisotropía, porque el agua ligada añadida se polariza de manera preferente a lo largo del eje favorecido. El secado hasta el 8 por ciento redujo tanto los valores absolutos como la relación. Por tanto, la anisotropía no es una constante fija del material, sino una constante modulada por la humedad, más intensa donde menos importa -- en estado húmedo -- y más débil donde el material está más seco; con la especificación de entrega de 12 $\pm$ 1 por ciento se distingue holgadamente y permanece estable.

4. MODELO DE CAPACITANCIA DISTRIBUIDA DE CUNA, CABLE Y COLUMNA

Para convertir tres permitividades en una decisión de diseño necesitamos la geometría del acoplamiento. El cable no se apoya sobre un bloque plano; descansa en una cuna, una ranura radial poco profunda mecanizada en la cara superior, de manera que un arco finito de la cubierta del cable queda separado de la madera únicamente por el espesor de la pared de la cubierta. La madera situada directamente bajo ese arco -- una columna vertical corta que va desde el fondo de la cuna hasta el cuerpo del bloque -- es donde el campo entre el conductor y cualquier retorno de masa distante alcanza su máxima intensidad y donde se almacena la inmensa mayoría de la capacitancia entre el cable y el soporte. La madera más alejada hacia los lados y hacia abajo contribuye con un peso que disminuye rápidamente a medida que el campo se extiende y se debilita.

Modelamos este sistema como una capacitancia distribuida por unidad de longitud del tendido, integrando la energía del campo local a través del volumen de madera situado bajo la cuna y a su alrededor, con el tensor de permitividad de la madera introducido eje por eje. La construcción es la habitual para un dieléctrico anisótropo: el componente vertical del campo muestrea la permitividad del eje vertical, los componentes horizontales muestrean las permitividades de los ejes horizontales y, puesto que la cuna concentra el campo en la región casi vertical situada justo bajo el conductor, mientras que las rutas de retorno que cierran la capacitancia discurren hacia fuera y hacia abajo por los flancos de la columna, las permitividades horizontales soportan la mayor parte de la energía almacenada. El resultado del modelo es una única cifra de interés técnico: la capacitancia que el bloque añade al cable, en pF por bloque, en función de cómo se oriente el tensor de permitividad.



Hay dos orientaciones de interés práctico. El mecanizado con la testa en vertical coloca el eje longitudinal L en vertical, siguiendo la ruta de carga, y deja los dos ejes transversales bajos R y T tendidos en el plano horizontal. El mecanizado por la cara -- corte tangencial con las fibras horizontales -- tiende el eje longitudinal L en el plano horizontal, donde lo muestrean los intensos componentes horizontales del campo, y coloca un eje transversal en vertical. Al introducir las constantes medidas al 12 por ciento en el modelo de una geometría de cuna representativa -- cable de 12 mm de diámetro, cuna radial de 3 mm, bloque de 60 mm de altura y retorno nominal de masa a la distancia del chasis -- se obtienen aproximadamente 1.9 pF por bloque para la orientación de testa y aproximadamente 2.3 pF por bloque para la orientación de cara: una diferencia cercana a 0.4 pF, aproximadamente un 18 por ciento, que surge exclusivamente del ángulo de corte. Por bloque, la diferencia es pequeña. También es real, repetible, de signo único y gratuita: al fabricante solo le cuesta decidir orientar correctamente la troza, y se acumula a lo largo de los varios bloques de un tendido completo.

5. BARRIDO ANGULAR Y SENSIBILIDAD A LA HUMEDAD

Las dos orientaciones citadas son los extremos de un continuo, y conviene confirmar que la testa constituye un mínimo verdadero y no solo la mejor de dos opciones arbitrarias. Mecanizamos una serie de probetas con ángulos de fibra desde 0 deg -- fibra vertical, testa verdadera --, pasando por 30, 45 y 60, hasta 90 deg -- fibra horizontal, cara -- con respecto al eje de carga, y medimos cada una en la geometría del modelo de cuna con un conductor energizado sobre ella. La capacitancia referida al cable aumentó de forma monótona con el ángulo de la fibra, desde el mínimo de testa a 0 deg hasta el máximo de cara a 90 deg, siguiendo de cerca la ponderación de coseno al cuadrado que predice el modelo tensorial conforme el eje longitudinal de alta permitividad gira progresivamente hacia el campo horizontal. La curva es poco pronunciada cerca de 0 deg -- unos pocos grados de error de mecanizado no cuestan casi nada -- y alcanza su mayor pendiente en la zona central del barrido, por lo que la penalización de un corte realmente descuidado es mayor que la de un corte imperfecto pero bien intencionado. El mínimo se encuentra en la testa verdadera, y es un mínimo, no un punto de inflexión.

El contenido de humedad desplaza verticalmente toda la curva sin mover la posición del mínimo. Como la permitividad aumenta con rapidez con el agua ligada, un bloque que haya pasado de un 12 a un 16 por ciento de humedad añade, en términos absolutos, más capacitancia que toda la diferencia entre testa y cara a humedad constante: la palanca de la humedad es mayor que la palanca de la orientación. Sin embargo, ambas son independientes: humedecer la madera eleva el suelo, pero no modifica qué orientación es la más baja. Por tanto, la orientación y el acondicionamiento son controles complementarios, y deben ejercerse ambos. Esta es la base medida para secar en horno cada troza clasificada en origen hasta 12 +/- 1 por ciento y para realizar la comprobación anual de humedad prevista en el programa de mantenimiento: la orientación queda mecanizada de forma permanente y no puede derivar, pero la humedad que la escala sí puede hacerlo, y un soporte que se deja equilibrar con una sala húmeda cede lentamente el margen que aseguró el banco de mecanizado.

Señalamos de paso que la concordancia entre los ejes transversales medida en la sección 3 hace que la elección entre una presentación radial o tangencial en el plano horizontal resulte irrelevante dentro de la incertidumbre de la medición; el bloque puede orientarse alrededor de su eje vertical para ofrecer el mejor aspecto de los anillos de la cara superior sin consecuencias dieléctricas, siempre que las fibras permanezcan verticales.

6. DISCUSIÓN: DOS ARGUMENTOS, UNA ORIENTACIÓN

La orientación de testa no se adoptó por su comportamiento dieléctrico. Se adoptó porque la testa es la forma más rígida y resistente de someter la madera a compresión: con las fibras en vertical, una carga descendente se transmite a lo largo de las células tubulares en su dirección más resistente, y el bloque soporta el peso estático de un tendido de cable y el asentamiento de una instalación con la mínima fluencia y el mínimo cambio dimensional. Es un principio antiguo e indiscutido de la ingeniería de la madera, y fijó la especificación de mecanizado antes de que se midiera ninguna permitividad.

Las mediciones dieléctricas presentadas aquí se realizaron después y, en principio, podrían haber discrepado de la elección mecánica: el eje a favor de la fibra podría haber sido el eje de baja permitividad, en cuyo caso colocarlo verticalmente habría sido mecánicamente correcto y eléctricamente incorrecto, y habría obligado a buscar un compromiso. No discreparon. El eje a favor de la fibra es el eje de alta permitividad, por lo que colocarlo en vertical lo retira del plano horizontal en el que el campo del cable alcanza su mayor intensidad, exactamente lo que exige el modelo de capacitancia. La orientación ideal desde el punto de vista mecánico es, de manera independiente, la orientación más silenciosa desde el punto de vista dieléctrico. Los dos argumentos se construyeron a partir de físicas diferentes, en momentos diferentes y por personas que resolvían problemas diferentes, y seleccionan el mismo corte.

No atribuimos ningún peso místico a esta concordancia; en los materiales anisótropos, el eje rígido y el eje de alta permitividad suelen estar alineados, porque ambas propiedades se remontan a la misma microestructura alineada, y la teca es uno de esos materiales. Sin embargo, la consecuencia práctica permanece. El fabricante que sigue únicamente el argumento mecánico llega a la testa y, sin pretenderlo, minimiza también el acoplamiento capacitivo. El fabricante que anula el argumento mecánico para obtener una veta de cara decorativa pierde en ambos aspectos a la vez. La convergencia no es tanto una coincidencia que deba maravillarnos como una razón para confiar en la especificación: cuando dos líneas de razonamiento independientes terminan en la misma cifra, es más probable que la cifra sea correcta.



7. CONCLUSIÓN

La madera es un cuerpo dieléctricamente anisótropo, y un soporte de cable de madera es ese cuerpo mantenido en el campo cercano de un conductor. Su contribución a la instalación es una pequeña capacitancia distribuida cuya magnitud fija el fabricante, lo sepa o no, en el banco de mecanizado. Medimos la permitividad y las pérdidas triaxiales de la teca ecuatorial, confirmamos el orden esperado $\epsilon_{ps_L} > \epsilon_{ps_R} \sim \epsilon_{ps_T}$ con una relación de anisotropía cercana a 1.3 al contenido de humedad de entrega, y trasladamos esas constantes a través de un modelo de capacitancia de cuna y columna hasta una cifra de mérito -- pF por bloque -- que difiere de forma medible entre el mecanizado por la testa y por la cara. La testa es la menor de las dos, por aproximadamente 0.4 pF y un 18 por ciento en una geometría representativa, y un barrido del ángulo de la fibra confirma que se trata de un mínimo verdadero.

El margen por bloque es pequeño y nos negamos a exagerarlo. Solo afirmamos que es real, que tiene una dirección preferida y que esa dirección preferida es la ya especificada por razones mecánicas. El Bloque de Elevación Equatorial se mecaniza con la testa en vertical porque la testa es la forma más rígida de soportar una carga de compresión; el análisis dieléctrico presentado aquí se realizó después y confirma que el mismo corte es también el más silencioso dieléctricamente. Cada bloque se entrega con la testa hacia arriba, secado en horno hasta 12 +/- 1 por ciento, sin acabado y con su grado y sus constantes medidas en el certificado. Invitamos al lector a preguntar a cualquier otro fabricante de soportes de madera en qué dirección discurre su fibra y por qué.

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] Norimoto, M. (1976). Propiedades dieléctricas de la madera. Wood Research: Bulletin of the Wood Research Institute, Kyoto University, 59/60, 106-152.
- [5] Bosque, A., Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2026). Clasificación de la neutralidad magnética de madera estructural: una clasificación de pureza por grados N para materiales de soporte de audio. 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.