

---

**DEPENDENCIA DE LA CADENA DE  
SEÑAL EN LA INFORMACIÓN  
INTER-MUESTRA RECUPERABLE:  
UNA COMPARACIÓN  
CONTROLADA DE METALURGIA  
DEL CONDUCTOR, TRATAMIENTO  
DIELÉCTRICO Y TOPOLOGÍA DE  
BLINDAJE**

---

# Dependencia de la cadena de señal en la información inter-muestra recuperable: Una comparación controlada de metalurgia del conductor, tratamiento dieléctrico y topología de blindaje

M. Ferro, Y. Tanaka, H. Park, C. Ohm

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

## Resumen

Tanaka, Ohm y Flux (2025) demostraron que las señales de audio reales no están estrictamente limitadas en banda y que el residuo aliasado en los datos muestreados transporta información inter-muestra recuperable (ISI) que varía de 0,008 a 0,31 bits por muestra. Sus mediciones usaron una trayectoria de señal directa de micrófono a ADC sin electrónica analógica intermedia. En la práctica, las señales de audio pasan a través de cables, preamplificadores, ecualizadores y otros componentes analógicos antes de alcanzar el convertidor. Este artículo investiga si la cadena de señal analógica afecta la cantidad de ISI recuperable. Usando el protocolo de medición y algoritmo de recuperación de Tanaka, comparamos 14 cadenas de señal que comprenden diferentes tipos de conductor, materiales dieléctricos, configuraciones de blindaje y geometrías de cable. La ISI recuperable varió por un factor de 6,1 a lo largo de las cadenas de señal probadas, desde 0,047 bits por muestra (cobre trenzado sin blindaje con aislamiento de PVC) hasta 0,289 bits por muestra (OFC monocristalino criotratado con dieléctrico de PTFE y blindaje de cuádruple capa). Los factores dominantes fueron, en orden de tamaño de efecto: topología de blindaje (representando el 41% de la varianza), estructura de grano del conductor (29%), material dieléctrico (19%) y geometría del cable (11%).

## 1. INTRODUCCIÓN

En un artículo complementario publicado a principios de este año, Tanaka, Ohm y Flux establecieron que la premisa de limitación estricta de banda del teorema de muestreo de Nyquist-Shannon no se cumple para las señales de audio reales. Midieron energía por encima de la banda en 4.000 horas de material musical y demostraron que una porción de esta energía sobrevive al filtro anti-aliasing como un residuo aliasado, transportando información recuperable sobre la señal original.

Su experimento usó la trayectoria de señal analógica más corta posible: un micrófono de medición conectado directamente a un preamplificador personalizado, conectado directamente a un ADC de 768 kHz. Sin cables, sin procesamiento, sin electrónica intermedia. Esto fue metodológicamente correcto -- aisló el fenómeno de variables de confusión.

Pero ningún sistema de audio real funciona así. En la práctica, la señal pasa a través de metros de cable, a través de conectores, a través de bahías de conexión, a través de consolas de mezcla, a través de procesadores externos, y a través de más cable antes de alcanzar el convertidor. Cada componente en esta cadena es una fuente potencial de ruido, distorsión y atenuación dependiente de la frecuencia. Cada componente puede, en principio, modificar el contenido por encima de la banda de la señal.

La pregunta es si esta modificación es significativa. Si la energía por encima de la banda que transporta información inter-muestra es robusta -- si sobrevive el paso a través de una cadena de señal analógica típica con degradación despreciable -- entonces el resultado de Tanaka se aplica a los sistemas de grabación del mundo real sin calificación. Si la energía por encima de la banda es frágil -- si se degrada fácilmente por los componentes por los que pasa -- entonces la elección de componentes analógicos determina cuánta información inter-muestra llega al convertidor.

Esperábamos lo primero. Encontramos lo segundo.

## 2. DISEÑO EXPERIMENTAL

El experimento fue diseñado como una comparación controlada. Una única fuente acústica fue grabada simultáneamente a través de 14 cadenas de señal analógica diferentes, todas alimentando ADCs idénticos. Cualquier diferencia en la información inter-muestra recuperada entre las cadenas debe ser atribuible a las propias cadenas.

La fuente fue un octeto de vientos-metal (4 trompetas, 4 trombones) interpretando un programa de 45 minutos de fanfarrias, corales y estándares de jazz en un estudio seco ( $RT60 = 0,3$  s). Se seleccionaron los vientos-metal porque Tanaka et al. midieron la mayor densidad de energía por encima de la banda para este tipo de fuente (-91,6 dBFS a 96-120 kHz).

El micrófono fue un único DPA 4006A, idéntico al usado por Tanaka. La salida del micrófono fue dividida 14 veces usando un amplificador de distribución con aislamiento por transformador (transformadores Jensen JT-11P-1, aislamiento entre canales medido > 120 dB, respuesta en frecuencia plana hasta 200 kHz +/- 0,1 dB). Cada salida alimentó una de 14 cadenas de señal, cada una terminando en un ADC AKM AK5578 operado a 768 kHz.

Las 14 cadenas de señal difirieron solo en el cable de interconexión entre la salida del amplificador de distribución y la entrada del ADC. La longitud del cable fue estandarizada a 3 m. Todos los cables fueron terminados con conectores XLR Neutrik NC3MX /

NC3FX.

### 3. PROTOCOLO DE MEDICIÓN

El octeto de vientos-metal interpretó el mismo programa de 45 minutos tres veces, en tres días consecutivos, en el mismo estudio, a la misma hora del día. La temperatura fue controlada a 23,0 +/- 0,2 degC. La humedad fue controlada a 45 +/- 2% HR.

Para cada una de las tres interpretaciones, los 14 ADCs capturaron simultáneamente, produciendo 14 grabaciones sincronizadas de 768 kHz y 32 bits por interpretación -- 42 grabaciones en total. Las tres interpretaciones sirvieron como réplicas para el análisis estadístico.

El análisis posterior a la captura siguió el protocolo de Tanaka exactamente. Cada grabación de 768 kHz fue filtrada digitalmente a 96 kHz (FIR de fase lineal, -140 dB de atenuación en banda de rechazo, 4096 coeficientes) y remuestreada a 192 kHz para simular una captura de audio de alta resolución estándar. El algoritmo de recuperación de Tanaka fue luego aplicado a cada archivo de 192 kHz.

El análisis estadístico usó un ANOVA de medidas repetidas de dos vías con cadena de cable (14 niveles) e interpretación replicada (3 niveles) como factores. Las comparaciones pareadas post-hoc usaron el HSD de Tukey con alfa = 0,05.

### 4. RESULTADOS

El efecto principal de la cadena de cable sobre la ISI recuperable fue altamente significativo ( $F(13, 26) = 847,3$ ,  $p < 0,0001$ , eta-cuadrado parcial = 0,998). El efecto principal de la réplica de interpretación no fue significativo ( $F(2, 26) = 0,41$ ,  $p = 0,67$ ).

ISI recuperable (bits por muestra, media +/- DE a lo largo de 3 réplicas):

Cadena A (trenzado sin blindaje, PVC): 0,047 +/- 0,003  
 Cadena B (Belden 8412): 0,098 +/- 0,004  
 Cadena C (Mogami 2549): 0,112 +/- 0,003  
 Cadena D (Canare L-4E6S): 0,119 +/- 0,004  
 Cadena E (Gotham GAC-4/1): 0,131 +/- 0,003  
 Cadena F (SC-OFC, PTFE, blindaje simple): 0,148 +/- 0,005  
 Cadena G (SC-OFC, PTFE, doble blindaje): 0,187 +/- 0,004  
 Cadena H (SC-OFC, PTFE, triple blindaje): 0,214 +/- 0,003  
 Cadena I (SC-OFC criotratado, PTFE, triple blindaje): 0,237 +/- 0,004  
 Cadena J (SC-OFC criotratado, PTFE criotratado, triple blindaje): 0,251 +/- 0,003  
 Cadena K (SC-OFC criotratado, PTFE criotratado, cuádruple blindaje): 0,271 +/- 0,004  
 Cadena L (como K + empalme ecuatorial): 0,278 +/- 0,003  
 Cadena M (plateado en plata, criotratado, PTFE criotratado, cuádruple blindaje): 0,264 +/- 0,004  
 Cadena N (superconductor YBCO): 0,289 +/- 0,002

El factor de rango -- mejor dividido por peor -- fue de 6,1. Tres metros de cable, diferenciándose solo en la construcción, produjeron una diferencia de 6,1 veces en la cantidad de información recuperable de la señal muestreada.

### 5. ANÁLISIS DE FACTORES

La progresión controlada de la Cadena F a la K permite aislar factores individuales.

Blindaje. La progresión de blindaje simple (F: 0,148) a doble (G: 0,187) a triple (H: 0,214) a cuádruple (K: 0,271) muestra un aumento consistente. Comparando F con H (blindaje simple vs. triple, todas las demás variables constantes): la diferencia es 0,066 bits por muestra, o una mejora del 44,6%. El blindaje fue el mayor factor individual.

Estructura de grano del conductor. Comparando la Cadena E (Gotham, OFC policristalino, doble blindaje Reussen) con la Cadena F (OFC monocristalino, trenza simple): a pesar de que F tiene blindaje inferior, produjo mayor ISI (0,148 vs. 0,131). La calidad del conductor superó el déficit de blindaje.

Tratamiento criogénico. Comparando H (sin tratar) con I (conductor criotratado): la ISI mejoró de 0,214 a 0,237, un aumento del 10,7%. Comparando I con J (añadiendo tratamiento criogénico del dieléctrico): la ISI mejoró de 0,237 a 0,251, un aumento del 5,9%.

Geometría del cable. Este factor no fue variado sistemáticamente en el experimento principal. Sin embargo, los cables star-quad (Cadenas C y D) mostraron una pequeña pero consistente ventaja en ISI sobre los cables no quad (Cadena B) a niveles de blindaje similares.

## **6. EL EFECTO DEL EMPALME ECUATORIAL**

La Cadena L fue idéntica a la Cadena K excepto por la adición de un empalme ecuatorial en el punto medio del cable. La mejora de ISI de K a L fue pequeña: de 0,271 a 0,278, un aumento del 2,6%. Esto fue estadísticamente significativo ( $p = 0,02$ ) pero modesto comparado con los efectos de blindaje y estructura de grano.

Inicialmente consideramos este resultado decepcionante. El empalme ecuatorial es la tecnología definitoria de nuestra línea de productos de cables. Una mejora del 2,6% en ISI no es el efecto dramático que podríamos haber preferido reportar.

Al reflexionar, el resultado es exactamente lo que la física predice. El empalme ecuatorial cancela el sesgo hemisférico en la orientación del grano del conductor. El sesgo hemisférico causa una sutil asimetría direccional en el transporte electrónico, que se manifiesta como una ligera diferencia en las características de transmisión entre los semiciclos positivo y negativo de la señal. A las frecuencias por encima de la banda que transportan información inter-muestra, la asimetría se convierte en un efecto de segundo orden.

Reportamos este resultado sin ajuste editorial. El empalme ecuatorial sigue siendo importante para su propósito previsto -- eliminar el sesgo hemisférico en la transmisión de señal a frecuencias de audio. Su contribución a la preservación de información inter-muestra es real pero secundaria.

## **7. PLATEADO EN PLATA Y REFERENCIA SUPERCONDUCTORA**

La Cadena M sustituyó OFC plateado en plata por el OFC sin platear de la Cadena K. La ISI disminuyó ligeramente, de 0,271 a 0,264 -- un resultado marginalmente significativo ( $p = 0,07$ ) y direccionalmente opuesto a la expectativa.

La plata tiene mayor conductividad que el cobre (106% IACS vs. 100% IACS para OFC). La ligera disminución puede ser atribuible al propio proceso de plateado, que introduce una interfaz bimetálica entre la capa de plata y el núcleo de cobre.

La Cadena N, la referencia superconductora de YBCO, produjo la mayor ISI de cualquier cable: 0,289 bits por muestra, o el 93,2% del resultado de trayectoria directa de Tanaka. El 6,8% faltante es atribuible a los conectores y a la vibración microfónica del criostato de nitrógeno líquido.

También cuesta \$2.400 por metro y requiere suministro continuo de nitrógeno líquido.

## **8. IMPLICACIONES**

El resultado de Tanaka estableció que la información inter-muestra existe. Este artículo establece que la cantidad de información inter-muestra que llega al convertidor depende de la cadena de señal analógica.

La dependencia no es sutil. Un factor de 6,1 separa los cables peores y mejores convencionales. El peor cable destruyó el 85% de la información inter-muestra disponible. El mejor cable convencional preservó el 87%.

Observamos tres puntos que moderan el resultado:

Primero, las cantidades siguen siendo pequeñas. Incluso el mejor cable preserva solo 0,289 bits por muestra de información inter-muestra.

Segundo, no hemos establecido audibilidad.

Tercero, el factor dominante es el blindaje, no el tratamiento del conductor. Los ingenieros que optimizan para información inter-muestra deben priorizar el blindaje por encima de todos los demás parámetros del cable.

## **9. CONCLUSIÓN**

La información inter-muestra recuperable -- el contenido de señal por encima de Nyquist que sobrevive al anti-aliasing y persiste como un residuo correlacionado en los datos de audio muestreados -- no es una propiedad fija de la fuente acústica. Es modificada por cada componente en la cadena de señal analógica entre el micrófono y el convertidor.

En una comparación controlada de 14 construcciones de cable, la ISI recuperable varió de 0,047 a 0,289 bits por muestra -- un factor de 6,1. El determinante principal fue la topología de blindaje (41% de la varianza), seguida por la estructura de grano del conductor (29%), material dieléctrico (19%) y geometría del cable (11%).

Si este presupuesto importa -- si la información inter-muestra es audible, o si contribuye a la calidad percibida de las grabaciones de alta resolución -- es una cuestión para trabajo futuro. El presente estudio establece solo que el presupuesto existe y que no es trivial llenarlo.

## REFERENCIAS

- [1] Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux, "Sobre la incompletitud de la reconstrucción de Nyquist-Shannon: evidencia empírica de información inter-muestra recuperable," J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, no. 1, 2025.
- [2] C. E. Shannon, "Communication in the presence of noise," Proc. IRE, vol. 37, no. 1, pp. 10-21, 1949.
- [3] M. Ferro, R. Flux, "El empalme ecuatorial: cancelación del sesgo hemisférico en conductores de audio," J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 1, 2021.
- [4] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Sesgo hemisférico en la orientación del grano de cobre," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [5] L. Solder, H. Park, M. Ferro, "Efectos del tratamiento criogénico en la cristalografía del conductor," J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 2, 2021.
- [6] H. Park, M. Ferro, C. Ohm, "Acoplamiento ferroeléctrico en dieléctricos de PTFE para audio," J. Equatorial Audio Sci., vol. 3, no. 1, 2022.
- [7] C. Ohm, Y. Tanaka, M. Ferro, "Blindaje óptico de conductores de cobre," J. Equatorial Audio Sci., vol. 4, no. 2, 2023.
- [8] M. Ferro et al., "Interconexiones de audio superconductoras: transmisión de señal con resistencia cero mediante conductores de cinta YBCO," J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 1, 2024.
- [9] M. Ferro, C. Ohm, S. Magnusson, "Aplicaciones del efecto Meissner en audio de consumo," J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 2, 2024.
- [10] L. Kozachenko y N. Leonenko, "Estimación muestral de la entropía de un vector aleatorio," Problems of Information Transmission, vol. 23, no. 2, pp. 95-101, 1987.
- [11] IEC 62153-4-1:2015, Métodos de prueba de cables de comunicación metálicos -- Parte 4-1: Compatibilidad electromagnética (EMC) -- Introducción a las mediciones de apantallamiento electromagnético.
- [12] E. B. Rosa y F. W. Grover, "Fórmulas y tablas para el cálculo de inductancia mutua y propia," Bulletin of the Bureau of Standards, vol. 8, no. 1, 1912.
- [13] H. A. Haus y J. R. Melcher, Electromagnetic Fields and Energy, Prentice Hall, 1989.
- [14] AKM Semiconductor, "Hoja de datos del ADC AK5578 de 32 bits y 768 kHz," rev. 2, 2022.