

---

**APLICACIONES DEL EFECTO  
MEISSNER EN AUDIO DE  
CONSUMO: EXPULSIÓN  
COMPLETA DEL FLUJO  
MAGNÉTICO COMO PARADIGMA  
DE BLINDAJE**

---

# Aplicaciones del efecto Meissner en audio de consumo: Expulsión completa del flujo magnético como paradigma de blindaje

M. Ferro, C. Ohm, S. Magnusson

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2024.

## Resumen

El blindaje electromagnético convencional se basa en la absorción y la reflexión -- mecanismos que atenúan los campos externos pero no pueden eliminarlos. El efecto Meissner en superconductores tipo II proporciona un paradigma fundamentalmente diferente: expulsión completa del flujo magnético del interior del conductor mediante la generación de corrientes de apantallamiento superficiales. Demostramos que una trayectoria de señal de audio encerrada en una cubierta superconductora experimenta cero acoplamiento con campos electromagnéticos externos de cualquier frecuencia, orientación o magnitud por debajo del campo de fuentes de EMI domésticas (routers WiFi, transformadores de potencia, compresores de refrigerador) confirman que la trayectoria del cable superconductor es electromagnéticamente invisible -- el campo interno es indistinguible del campo en el espacio vacío. Discutimos las implicaciones del blindaje Meissner para el diseño del sistema de audio superconductor completo.

## 1. INTRODUCCIÓN

El blindaje electromagnético ha sido una preocupación de la industria de cables de audio desde los primeros días de la reproducción de alta fidelidad. Trenza de cobre, lámina de aluminio, lámina de mu-metal, capas de polímero conductivo, envolturas de fibra de carbono -- el catálogo de materiales de blindaje es extenso y se expande continuamente. Cada material ofrece una combinación diferente de permeabilidad magnética, conductividad eléctrica y atenuación dependiente de la frecuencia, y cada uno ha sido comercializado como la solución definitiva a la interferencia electromagnética.

Ninguno de ellos lo es. Todo material de blindaje convencional opera por los mismos dos mecanismos: absorción (conversión de energía electromagnética en calor a través de corrientes parásitas) y reflexión (redirección de energía electromagnética lejos del conductor a través de desajuste de impedancia). Ambos mecanismos son inherentemente imperfectos. La absorción depende del espesor del material y la frecuencia; los blindajes delgados dejan pasar frecuencias bajas. La reflexión depende del contraste de impedancia; a ciertos ángulos y frecuencias, los campos penetran independientemente.

El efecto Meissner es diferente en tipo, no meramente en grado. Cuando un superconductor tipo II se enfría por debajo de su temperatura crítica en presencia de un campo magnético externo, surgen espontáneamente corrientes de apantallamiento superficiales que generan un campo exactamente igual y opuesto al campo aplicado. El campo neto dentro del superconductor es cero -- no pequeño, no atenuado, cero. Este no es un parámetro de diseño que pueda optimizarse; es una propiedad fundamental del estado superconductor, tan intrínseca como la resistencia cero.

## 2. VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL

Un par de interconexiones SC de 1,5 m fue instalado en una sala de escucha residencial estándar junto con las siguientes fuentes de EMI:

Fuente A: Router WiFi 6E (6 GHz, ancho de banda de 160 MHz, potencia de transmisión de 1 W) a 0,5 m de distancia.

Fuente B: Transformador de potencia toroidal de 500 VA a 0,3 m de distancia.

Fuente C: Motor compresor de refrigerador (en funcionamiento) a 1,0 m de distancia.

Fuente D: Amplificador de conmutación clase D (onda cuadrada de 1 kHz, 100 W) a 0,2 m de distancia.

Fuente E: Las cuatro fuentes operando simultáneamente.

El campo magnético interno en el conductor del cable fue medido por un micro-sensor fluxgate (Bartington Mag690, resolución de 0,1 nT) insertado en el criostato a través de un puerto de medición dedicado.

Para comparación, se realizaron mediciones idénticas en cuatro cables convencionales: OFC sin blindaje, trenza de cobre simple, doble trenza de cobre + lámina de mu-metal, e interconexión Equinox de Equatorial Audio (blindaje de triple capa).

Resultados (campo magnético RMS en el conductor, Fuente E, todas las fuentes activas simultáneamente):

OFC sin blindaje: 847 nT

Trenza de cobre simple: 124 nT (17 dB de atenuación)

Doble trenza + mu-metal: 8,3 nT (40 dB de atenuación)

Equinox triple capa: 1,7 nT (54 dB de atenuación)

Interconexión SC (Meissner): < 0,1 nT (> 79 dB de atenuación; limitado por el piso de ruido del magnetómetro)

El campo interno del cable superconductor fue indistinguible del piso de ruido del magnetómetro bajo todas las condiciones de prueba, incluyendo la operación simultánea peor caso de todas las fuentes de EMI.

### 3. EL SISTEMA SUPERCONDUCTOR COMPLETO

El potencial completo del blindaje Meissner se realiza solo cuando toda la cadena de señal es superconductora. Un solo segmento de cable convencional en un sistema por lo demás superconductor crea una «ventana magnética» a través de la cual los campos externos pueden acoplarse a la señal.

El sistema de referencia Zero Kelvin aborda esto proporcionando cables superconductores para cada segmento de la cadena de señal: alimentación (cable de alimentación SC), reloj (cable de reloj de palabras SC), digital (cable digital SC), analógico (interconexión SC) y altavoz (cable de altavoz SC). El depósito central de LN, y el distribuidor de LN, mantienen los segmentos de cable se mantengan a 77 K simultáneamente.

Cuando el sistema completo está operativo, la trayectoria de señal de audio desde la toma de corriente hasta el driver del altavoz está completamente encerrada en material superconductor. Cada segmento exhibe cero resistencia y expulsión completa del flujo Meissner. El sistema logra lo que ninguna combinación de blindaje convencional puede: invisibilidad electromagnética.

La diferencia práctica es más audible durante condiciones de alta EMI ambiental. En una demostración para un panel de críticos de audio (Munich High End 2024), el sistema de referencia Zero Kelvin fue operado en una sala con contaminación EMI deliberada (múltiples routers WiFi, un calentador de inducción de 2 kW y una aspiradora en funcionamiento). Los críticos no pudieron detectar ninguna diferencia en la calidad del sonido entre las condiciones limpias y contaminadas. El sistema fue, electromagnéticamente hablando, inconsciente de que la interferencia existía.

### 4. CONCLUSIÓN

El efecto Meissner proporciona blindaje electromagnético que es fundamentalmente completo -- no atenuado, no dependiente de la frecuencia, sino absoluto. Las trayectorias de señal de audio encerradas en material superconductor son inmunes a los campos electromagnéticos externos de cualquier frecuencia y cualquier magnitud por debajo del campo crítico. El sistema de referencia Zero Kelvin demuestra que una cadena de señal superconductora completa es alcanzable en un entorno residencial, dada la infraestructura criogénica apropiada. Proponemos que el blindaje Meissner representa el límite físico de la protección electromagnética para trayectorias de señal de audio.

### REFERENCIAS

- [1] W. Meissner, R. Ochsenfeld, "Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit," *Naturwissenschaften*, vol. 21, pp. 787-788, 1933.
- [2] M. Tinkham, *Introduction to Superconductivity*, 2nd ed., Dover, 2004.
- [3] J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer, "Theory of superconductivity," *Phys. Rev.*, vol. 108, pp. 1175-1204, 1957.
- [4] A. A. Abrikosov, "On the magnetic properties of superconductors of the second group," *Sov. Phys. JETP*, vol. 5, pp. 1174-1182, 1957.
- [5] M. Ferro et al., "Interconexiones de audio superconductoras: transmisión de señal con resistencia cero mediante conductores YBCO a 77K," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 5, no. 1, 2024.
- [6] IEC 61000-4-8:2009, *Compatibilidad electromagnética (EMC) -- Técnicas de prueba y medición -- Prueba de inmunidad a campo magnético de frecuencia de potencia*.