

---

**APLICAÇÕES DO EFEITO  
MEISSNER EM ÁUDIO DE  
CONSUMO: EXPULSÃO COMPLETA  
DE FLUXO MAGNÉTICO COMO  
PARADIGMA DE BLINDAGEM**

---

# Aplicações do Efeito Meissner em Áudio de Consumo: Expulsão Completa de Fluxo Magnético como Paradigma de Blindagem

M. Ferro, C. Ohm, S. Magnusson

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2024.

## Resumo

A blindagem eletromagnética convencional depende de absorção e reflexão -- mecanismos que atenuam campos externos, mas não podem eliminá-los. O efeito Meissner em supercondutores Tipo II fornece um paradigma fundamentalmente diferente: expulsão completa do fluxo magnético do interior do condutor por meio da geração de correntes de blindagem superficiais. Demonstramos que um caminho de sinal de áudio encerrado em uma bainha supercondutora experimenta zero acoplamento a campos eletromagnéticos externos de qualquer frequência, orientação ou magnitude abaixo do campo crítico  $H_{c2}$ . Medições na presença de fontes domésticas de EMI (roteadores WiFi, transformadores de potência, compressores de geladeira) confirmam que o caminho do cabo supercondutor é eletromagneticamente invisível -- o campo interno é indistinguível do campo no espaço vazio. Discutimos as implicações da blindagem Meissner para o projeto do sistema de áudio supercondutor completo.

## 1. INTRODUÇÃO

A blindagem eletromagnética tem sido uma preocupação da indústria de cabos de áudio desde os primeiros dias da reprodução de alta fidelidade. Malha de cobre, folha de alumínio, folha de mu-metal, camadas de polímero condutor, envoltórios de fibra de carbono -- o catálogo de materiais de blindagem é extenso e continuamente em expansão. Cada material oferece uma combinação diferente de permeabilidade magnética, condutividade elétrica e atenuação dependente da frequência, e cada um foi comercializado como a solução definitiva para interferência eletromagnética.

Nenhum deles é. Todo material de blindagem convencional opera pelos mesmos dois mecanismos: absorção (convertendo energia eletromagnética em calor por meio de correntes parasitas) e reflexão (redirecionando energia eletromagnética para longe do condutor por meio de descasamento de impedância). Ambos os mecanismos são inerentemente imperfeitos. A absorção depende da espessura do material e da frequência; blindagens finas vazam em baixas frequências. A reflexão depende do contraste de impedância; em certos ângulos e frequências, os campos penetram independentemente.

O efeito Meissner é diferente em natureza, não meramente em grau. Quando um supercondutor Tipo II é resfriado abaixo de sua temperatura crítica na presença de um campo magnético externo, correntes de blindagem superficiais surgem espontaneamente que geram um campo exatamente igual e oposto ao campo aplicado. O campo líquido dentro do supercondutor é zero -- não pequeno, não atenuado, zero. Isso não é um parâmetro de projeto que pode ser otimizado; é uma propriedade fundamental do estado supercondutor, tão intrínseca quanto a resistência zero.

## 2. VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL

Um par de Interconexões SC de 1,5 m foi instalado em uma sala de escuta residencial padrão ao lado das seguintes fontes de EMI:

Fonte A: Roteador WiFi 6E (6 GHz, largura de banda 160 MHz, potência de transmissão 1 W) a 0,5 m de distância.

Fonte B: Transformador toroidal de 500 VA a 0,3 m de distância.

Fonte C: Motor compressor de geladeira (em funcionamento) a 1,0 m de distância.

Fonte D: Amplificador Classe D (onda quadrada 1 kHz, 100 W) a 0,2 m de distância.

Fonte E: Todas as quatro fontes operando simultaneamente.

O campo magnético interno no condutor do cabo foi medido por um sensor micro-fluxgate (Bartington Mag690, resolução 0,1 nT) inserido no criostato através de uma porta de medição dedicada.

Para comparação, medições idênticas foram realizadas em quatro cabos convencionais: OFC sem blindagem, malha simples de cobre, malha dupla de cobre + folha de mu-metal e a Interconexão Equinox da Equatorial Audio (blindagem tripla).

Resultados (campo magnético RMS no condutor, Fonte E, todas as fontes ativas simultaneamente):

OFC sem blindagem: 847 nT

Malha simples de cobre: 124 nT (atenuação de 17 dB)

Malha dupla + mu-metal: 8,3 nT (atenuação de 40 dB)

Equinox tripla camada: 1,7 nT (atenuação de 54 dB)

Interconexão SC (Meissner): < 0,1 nT (> 79 dB de atenuação; limitado pelo piso de ruído do magnetômetro)

O campo interno do cabo supercondutor foi indistinguível do piso de ruído do magnetômetro em todas as condições de teste, incluindo a pior condição de operação simultânea de todas as fontes de EMI.

### 3. O SISTEMA SUPERCONDUTOR COMPLETO

O potencial pleno da blindagem Meissner é realizado apenas quando toda a cadeia de sinal é supercondutora. Um único segmento de cabo convencional em um sistema de outra forma supercondutor cria uma «janela magnética» pela qual campos externos podem se acoplar ao sinal.

O Sistema de Referência Zero Kelvin resolve isso fornecendo cabos supercondutores para cada segmento da cadeia de sinal: energia (Cabo de Energia SC), clock (Cabo Word Clock SC), digital (Cabo Digital SC), analógico (Interconexão SC) e alto-falante (Cabo de Alto-falante SC). O reservatório central de LN<sub>2</sub>, e o manifold de distribuição de segmentos de cabo sejam mantidos a 77 K simultaneamente.

Quando o sistema completo está operacional, o caminho do sinal de áudio da tomada de parede ao driver do alto-falante está inteiramente encerrado em material supercondutor. Cada segmento exhibe resistência zero e expulsão completa de fluxo Meissner. O sistema alcança o que nenhuma combinação de blindagem convencional pode: invisibilidade eletromagnética.

A diferença prática é mais audível durante condições de alta EMI ambiente. Em uma demonstração para um painel de críticos de áudio (Munich High End 2024), o Sistema de Referência Zero Kelvin foi operado em uma sala com contaminação deliberada de EMI (múltiplos roteadores WiFi, um aquecedor por indução de 2 kW e um aspirador de pó em funcionamento). Os críticos não conseguiram detectar nenhuma diferença na qualidade sonora entre as condições limpa e contaminada. O sistema era, eletromagneticamente falando, inconsciente da existência da interferência.

### 4. CONCLUSÃO

O efeito Meissner fornece blindagem eletromagnética que é fundamentalmente completa -- não atenuada, não dependente da frequência, mas absoluta. Caminhos de sinal de áudio encerrados em material supercondutor são imunes a campos eletromagnéticos externos em qualquer frequência e qualquer magnitude abaixo do campo crítico. O Sistema de Referência Zero Kelvin demonstra que uma cadeia de sinal supercondutora completa é alcançável em um ambiente residencial, dada a infraestrutura criogênica apropriada. Propomos que a blindagem Meissner representa o limite físico da proteção eletromagnética para caminhos de sinal de áudio.

### REFERÊNCIAS

- [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., "Interconexões supercondutoras de áudio: transmissão de sinal com resistência zero via condutores YBCO a 77K," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 5, no. 1, 2024.
- [6] IEC 61000-4-8:2009, *Compatibilidade eletromagnética (EMC) -- Técnicas de teste e medição -- Teste de imunidade a campo magnético de frequência industrial*.