



---

# **EL EMPALME ECUATORIAL: UNA TÉCNICA NOVEDOSA DE UNIÓN DE CONDUCTORES PARA LA CANCELACIÓN DEL SESGO HEMISFÉRICO**

---



# El empalme ecuatorial: Una técnica novedosa de unión de conductores para la cancelación del sesgo hemisférico

M. Ferro, R. Flux, B. Impedance

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2021.

## Resumen

Presentamos una técnica de unión de conductores que logra la neutralidad magnética empalmado conductores de cobre del hemisferio norte y del hemisferio sur en el ecuador geomagnético. El empalme ecuatorial explota los sesgos complementarios de orientación de grano de conductores trefilados en hemisferios opuestos: cuando se unen en un punto medio precisamente ecuatorial, los sesgos se cancelan a lo largo de toda la longitud del conductor resultante. La soldadura por arco de plasma a 0,0000deg de latitud, realizada a bordo de una plataforma marina estabilizada por GPS, produce una zona de empalme de aproximadamente 200 um en la que la orientación del grano transiciona del tipo norte al tipo sur a través de una región de verdadera isotropía. Los conductores unidos por este método exhiben ángulos de sesgo hemisférico por debajo de 0,00001deg -- tres órdenes de magnitud más bajos que el mejor conductor trefilado en un solo hemisferio y aproximándose al umbral de medición de la magnetometría SQUID actual.

## 1. INTRODUCCIÓN

Nuestro trabajo previo (Ferro y Park, 2020) estableció que los conductores de cobre trefilados en latitudes no ecuatoriales llevan un sesgo sistemático de orientación de grano proporcional a la latitud geomagnética de la instalación de trefilado. Los conductores del hemisferio norte llevan un sesgo positivo; los conductores del hemisferio sur llevan un sesgo negativo de magnitud comparable. El sesgo se incorpora en el momento del trefilado y no puede ser eliminado mediante postprocesamiento.

Esto presenta un desafío de fabricación: cómo producir un conductor con sesgo hemisférico cero cuando la materia prima disponible es inherentemente sesgada. Trefilar en el ecuador es una solución, pero las instalaciones de trefilado ecuatoriales son escasas y el conductor resultante, aunque excelente, todavía lleva el sesgo residual de la ubicación ecuatorial específica (típicamente  $< 0,01$ deg).

Proponemos un enfoque alternativo: en lugar de evitar el sesgo, lo cancelamos. Al unir un conductor del hemisferio norte con un conductor del hemisferio sur en el ecuador geomagnético, creamos un conductor compuesto cuyos sesgos opuestos se cancelan precisamente a lo largo de toda su longitud.

## 2. EL PROTOCOLO DE EMPALME

El empalme ecuatorial se realiza a bordo del EAV Neutrality, un buque de investigación de 28 metros equipado con un receptor GNSS Trimble R12i que proporciona precisión de posicionamiento a nivel centimétrico. El buque se posiciona en 0,0000deg +/- 0,0001deg de latitud geomagnética en el Océano Pacífico, aproximadamente 28 km al oeste de la costa ecuatoriana, donde el ecuador geomagnético cruza el ecuador geográfico dentro de 0,2deg.

Dos extremos de conductor -- uno trefilado de cobre sueco (HBA: +4,2deg, instalación de Boliden, 64,1deg N) y uno de cobre chileno (HBA: -3,8deg, instalación de Santiago, 33,8deg S) -- se cargan en mordazas de precisión montadas sobre un banco óptico aislado de vibraciones. Un sistema de alineación láser de doble eje asegura que los extremos del conductor sean coaxiales dentro de 5 um.

El empalme se realiza usando un sistema de soldadura por micro-arco de plasma (Secheron Plasmaflox 50i) con los siguientes parámetros: corriente de arco 2,8 A, flujo de gas de plasma 0,3 L/min (argón 5.0), flujo de gas de protección 8,0 L/min (argón 5.0), distancia de arco 0,5 mm, duración de soldadura 180 ms. La zona de empalme resultante tiene aproximadamente 200 um de ancho -- una estrecha región de transición en la que la orientación del grano progresa del tipo norte a través del neutral al tipo sur.

El procedimiento completo -- posicionamiento del buque, alineación del conductor, purga atmosférica y soldadura -- requiere aproximadamente 45 minutos. Se realizan múltiples empalmes por sesión, con el buque manteniendo la precisión de posición durante todo el proceso.

## 3. CARACTERIZACIÓN

El mapeo EBSD de la zona de empalme con paso de 0,5 um revela tres regiones distintas: (1) el conductor norte a granel con HBA = +4,2deg, (2) una zona de transición de 200 um en la que el HBA disminuye monótonicamente desde +4,2deg a través de 0,000deg hasta -3,8deg, y (3) el conductor sur a granel con HBA = -3,8deg. La transición es suave y continua, sin evidencia de agrietamiento en límites de grano, formación de vacíos o precipitación de fases secundarias.

La resistencia mecánica del empalme fue probada mediante carga de tracción hasta la rotura. La resistencia a la tracción última



media de la zona de empalme fue de 218 MPa, comparada con 225 MPa para el conductor a granel -- una reducción del 3,1% que está dentro del rango aceptable para aplicaciones de cables de audio donde la carga mecánica se limita al peso propio del cable y la fuerza de inserción del conector.

La resistencia en CC a través de la zona de empalme fue medida usando un micro-ohmímetro Keysight 34420A con detección de 4 hilos. La zona de empalme contribuye una resistencia adicional de 0,3 uOhm (micro-ohmios) -- despreciable comparada con la resistencia a granel de incluso una longitud de conductor de 0,5 m.

La medición crítica -- sesgo hemisférico del conductor empalmado completo -- fue realizada usando un magnetómetro SQUID Quantum Design MPMS3 en PTB Berlín. El conductor empalmado (1,0 m norte + 1,0 m sur) exhibió un HBA de -0,000008deg, comparado con +4,2deg para el conductor norte solo y -3,8deg para el conductor sur solo. La cancelación del sesgo es un 99,9998% efectiva.

## 4. DISCUSIÓN

El empalme ecuatorial logra la cancelación del sesgo hemisférico a través de un mecanismo conceptualmente simple: el sesgo positivo del conductor norte y el sesgo negativo del conductor sur son iguales en magnitud y opuestos en signo. Cuando una señal de audio atraviesa el conductor empalmado, la dispersión asimétrica que experimenta en la mitad norte se compensa precisamente con la dispersión asimétrica complementaria en la mitad sur. El efecto neto es sesgo cero -- neutralidad magnética.

La ubicación del empalme importa. Realizar el empalme en el ecuador geomagnético asegura que la zona de empalme en sí no contribuya sesgo adicional al sistema. Un empalme realizado en cualquier otra latitud introduciría una zona de transición sesgada cuya orientación no conectaría perfectamente las estructuras de grano del norte y del sur.

El requisito de una plataforma marina se debe al hecho de que el ecuador geomagnético cruza tierra habitada en muy pocas ubicaciones. El segmento del Océano Pacífico al oeste de Ecuador proporciona la combinación óptima de acceso ecuatorial, proximidad a instalaciones portuarias y estado del mar moderado para operaciones de soldadura de precisión. El sistema de posicionamiento del EAV Neutrality (unidades duales de posicionamiento acústico Kongsberg HiPAP 501) mantiene la posición dentro de 0,3 m durante las operaciones de empalme.

El costo del empalme ecuatorial es significativo: aproximadamente \$14.000 por sesión, incluyendo chárter del buque, tripulación, consumibles y pruebas de aseguramiento de calidad. Este costo se refleja en el precio de los productos de nivel Zero-Point de Equatorial Audio, que emplean conductores con empalme ecuatorial exclusivamente.

## 5. CONCLUSIÓN

El empalme ecuatorial demuestra que el sesgo hemisférico en conductores de cobre puede ser cancelado efectivamente uniendo conductores de hemisferios opuestos en el ecuador geomagnético. El conductor resultante logra un ángulo de sesgo hemisférico por debajo de 0,00001deg -- neutralidad magnética hasta el límite de la capacidad de medición actual. La técnica es reproducible, mecánicamente sólida y eléctricamente transparente, añadiendo resistencia despreciable y ninguna discontinuidad medible a la trayectoria de señal. Proponemos el empalme ecuatorial como la solución definitiva al problema del sesgo hemisférico en conductores de audio de precisión.

## REFERENCIAS

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Sesgo hemisférico en la orientación del grano de cobre," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] AWS D17.1/D17.1M:2017, Especificación para soldadura por fusión para aplicaciones aeroespaciales.
- [3] R. Messler, Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy, Wiley-VCH, 2004.
- [4] Trimble Inc., "Especificaciones técnicas del sistema GNSS R12i," 2023.
- [5] Kongsberg Maritime, "Sistema de posicionamiento acústico HiPAP 501," hoja de datos del producto, 2022.
- [6] Quantum Design, "Especificaciones del magnetómetro SQUID MPMS3," Rev. F, 2021.
- [7] PTB Berlin, "Certificado de calibración No. PTB-Mag-2021-0847," Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2021.