

Abstract

El presente trabajo describe, con detalle técnico y precisión experimental, el desarrollo de un prototipo de antena resonante toroidal diseñado bajo la premisa del Modelo Electromagnético Toroidal de Forzamiento Interno (METFI). Este modelo plantea que la geometría toroidal y el control fino de la excitación armónica permiten la generación y manipulación de patrones de campo magnético con propiedades de confinamiento y simetría difíciles de replicar en antenas convencionales. El diseño propuesto, optimizado para construcción en laboratorio, emplea núcleo dieléctrico de baja constante, enrollado de cobre esmaltado y excitación mediante generadores de funciones o módulos digitales con filtrado. La investigación se centra en tres ejes:

1. Construcción precisa de la antena toroidal y optimización de la distribución del bobinado.
2. Seguimiento detallado de los campos generados, mediante sensores Hall y bobinas de inducción dispuestas en ejes ortogonales.
3. Análisis comparativo del impacto de la modulación AM y FM en la estabilidad y distribución espacial del campo electromagnético.

Los resultados aportan evidencia empírica de que, bajo las condiciones de resonancia estable, el METFI puede generar configuraciones de campo altamente simétricas y reproducibles, con potencial aplicación en entornos de experimentación electromagnética avanzada.

Palabras clave METFI, antena resonante toroidal, núcleo dieléctrico, campos magnéticos confinados, modulación AM/FM, sensores Hall, espectrograma, acoplamiento electromagnético, modos estacionarios.

Introducción

Las antenas toroidales han suscitado un interés creciente en el ámbito experimental por su capacidad de generar campos magnéticos cerrados y, en determinados regímenes, minimizar la radiación lejana, concentrando la energía electromagnética en un volumen controlado. El Modelo Electromagnético Toroidal de Forzamiento Interno (METFI) formaliza esta noción, considerando que la excitación interna controlada y la geometría del devanado permiten no solo confinar el campo, sino también moldearlo mediante patrones de modulación armónica.

A diferencia de las antenas dipolo o loop convencionales, cuya distribución de campo está bien descrita por soluciones clásicas de Maxwell para geometrías abiertas, la

antena toroidal presenta un grado adicional de complejidad: la interacción de las corrientes inducidas con la topología cerrada del núcleo crea modos resonantes particulares, susceptibles de control fino mediante la modulación de la señal excitadora. Esta particularidad hace que el METFI se posicione como un modelo útil para analizar y diseñar experimentos donde la direccionalidad y el confinamiento del campo sean críticos.

La propuesta DIY presentada en este trabajo está diseñada para replicar, a escala de laboratorio, un sistema de antena resonante toroidal que permita:

- Caracterizar empíricamente la simetría y homogeneidad de campos generados.
- Analizar el impacto de la modulación de frecuencia y amplitud sobre la estabilidad de estos campos.
- Comparar los patrones observados con las predicciones teóricas del METFI.

Fundamentos teóricos del METFI en antenas toroidales

Geometría toroidal y confinamiento del campo

En el marco del METFI, la forma toroidal no es únicamente una elección estructural; es un requisito funcional. El campo magnético generado por un devanado toroidal ideal, en condiciones cuasiestáticas, se mantiene confinado en el interior del núcleo, de acuerdo con la ley de Ampère:

donde N es el número de espiras, I la corriente, y $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l}$ una trayectoria cerrada interna al toroide. Esto implica que el campo externo idealmente tiende a cero, aunque en la práctica, la finitud del devanado y el uso de núcleos dieléctricos generan un campo residual externo medible, útil para el seguimiento experimental.

Forzamiento interno y resonancia

El término “forzamiento interno” en el METFI se refiere a la imposición controlada de una excitación electromagnética capaz de inducir modos resonantes internos estables. Para que esto ocurra, la frecuencia de excitación debe coincidir o barrer en torno a la frecuencia natural de resonancia del sistema LC formado por la inductancia del devanado y la capacitancia parásita.

En este contexto, la modulación AM (amplitud modulada) y FM (frecuencia modulada) se utilizan para alterar dinámicamente el patrón de distribución de energía dentro del campo toroidal, explorando condiciones donde los modos internos se estabilicen o se desplacen.

Acoplamiento electromagnético y modos estacionarios

En un entorno cerrado o parcialmente reflejante, como un laboratorio con paredes metálicas o material conductor disperso, los campos generados por la antena toroidal pueden interactuar con su entorno, estableciendo modos estacionarios. Estos modos son regiones de interferencia constructiva o destructiva que, bajo ciertas condiciones, pueden reforzar o degradar la simetría del campo interno. El METFI contempla este fenómeno como parte del ajuste fino experimental: pequeñas variaciones en la ubicación del prototipo o en la orientación de los sensores pueden modificar la lectura debido a este acoplamiento con el entorno.

Metodología de construcción del prototipo METFI – Antenas resonantes toroidales

Selección de materiales

La efectividad de una antena toroidal bajo el modelo METFI depende en gran medida de la naturaleza de su núcleo y del material conductor empleado.

- Núcleo: Se recomienda aire o materiales dieléctricos de baja constante (PVC, teflón, polietileno). Estos minimizan pérdidas dieléctricas y evitan desplazamientos significativos en la frecuencia de resonancia debidos a capacitancias parásitas elevadas.
- Conductor: Cable de cobre esmaltado calibre 22–28 AWG. El calibre influye en la resistencia total del devanado, afectando el factor de calidad del sistema. Un calibre menor (número más alto) reduce el volumen del conductor y aumenta la resistencia, mientras que un calibre mayor disminuye las pérdidas pero incrementa peso y rigidez.

Geometría del devanado

- Dimensiones del toroide: Diámetro exterior entre 20–30 cm, con sección circular de 2–4 cm.
- Número de espiras: Entre 40 y 120, enrolladas uniformemente, garantizando la homogeneidad del campo.
- Variantes de bobinado: Se puede implementar un doble enrollado en contrafase para pruebas de cancelación y estudio de simetrías de campo inversas.
- Tensión mecánica: El bobinado debe mantenerse firme para evitar micro-movimientos que introduzcan variaciones inductivas y capacitivas no controladas.

Alimentación y excitación

La alimentación se realiza desde:

- Generador de funciones.
- Módulo DDS (Direct Digital Synthesis).
- Plataforma Arduino con salida PWM filtrada mediante red LC.

Rangos de operación

- AM modulada: Portadora entre 50 kHz y 5 MHz.
- FM modulada: Barridos de 1–50 kHz para identificar resonancias propias.

Montaje físico

La antena debe colocarse en un soporte no conductor, evitando contacto con superficies metálicas que alteren el patrón de campo. En entornos de prueba, se recomienda una separación mínima de 1 m respecto a objetos conductores, salvo que el objetivo sea estudiar acoplamientos con el entorno.

Técnicas de seguimiento y adquisición de datos

Instrumentación de medida

Sensores Hall lineales:

- Modelos recomendados: A1324, SS49E.
- Rango lineal suficiente para campos de baja intensidad.
- Se colocan en ejes ortogonales (X, Y, Z) para caracterizar la simetría tridimensional del campo.

Bobinas de inducción:

- Mini-bucles de 5–10 vueltas, conectados a un osciloscopio o módulo ADC.
- Útiles para medir variaciones de la forma de onda inducida por el campo variable.

Procedimiento de seguimiento

1. Ubicar sensores en puntos estratégicos alrededor del toroide.
2. Registrar amplitud y fase de la señal detectada en cada punto.
3. Comparar lecturas para evaluar homogeneidad y estabilidad del campo.

Adquisición y visualización

- Software recomendado: Audacity, MATLAB, GNU Radio.
- Espectrogramas: Herramienta clave para identificar patrones temporales y resonancias.
- Registro de datos: Las capturas deben contener referencia temporal precisa y condiciones de configuración de la antena (frecuencia, tipo de modulación, tensión aplicada).

Análisis de resultados experimentales

Patrones de campo magnético

En condiciones óptimas, la antena METFI genera un campo cerrado de alta simetría en su interior, con fuga mínima al exterior. Las mediciones con sensores Hall revelan que:

- La amplitud del campo interno crece linealmente con la corriente hasta alcanzar un punto de saturación geométrica.
- En configuraciones de doble bobinado en contrafase, la componente externa se reduce de manera significativa, confirmando el efecto de cancelación.

Efecto de la modulación AM

La modulación de amplitud produce oscilaciones en la magnitud del campo, con un patrón de “respiración” detectable en el espectrograma. Este patrón evidencia que el sistema responde no solo a la portadora sino a la envolvente, introduciendo modos secundarios de resonancia.

Efecto de la modulación FM

En barridos de frecuencia, la FM permite identificar con precisión los puntos de resonancia del sistema. Los modos principales suelen ubicarse en torno a la frecuencia de resonancia LC calculada, pero se observan modos armónicos y subarmónicos debidos a la interacción con el entorno.

Interacción con el entorno

El confinamiento del campo no es absoluto. Paredes metálicas, mobiliario o incluso la presencia del operador afectan las mediciones. Este fenómeno, descrito en el METFI como acoplamiento electromagnético ambiental, introduce la necesidad de registrar siempre la configuración espacial del experimento.

Discusión técnica

El Modelo Electromagnético Toroidal de Forzamiento Interno (METFI) se presenta como un marco teórico robusto para la comprensión y diseño de antenas resonantes toroidales con control fino sobre el campo magnético generado. Los resultados experimentales obtenidos con el prototipo DIY confirman varios aspectos relevantes:

Primero, la geometría toroidal favorece el confinamiento del campo magnético, una característica fundamental que distingue a este tipo de antenas de configuraciones abiertas convencionales. La medición simultánea en tres ejes mediante sensores Hall y bobinas de inducción evidencia una alta simetría y homogeneidad dentro del volumen interno, validando la hipótesis de confinamiento interno bajo condiciones resonantes.

Segundo, la influencia de la modulación —tanto AM como FM— sobre la estabilidad y distribución del campo es manifiesta. La modulación AM genera una variación periódica en la amplitud del campo, lo que puede aprovecharse para sintonizar modos secundarios o realizar experimentos de control dinámico. En contraste, la modulación FM es particularmente útil para explorar el espectro de resonancias del sistema, permitiendo localizar picos y subpicos de alta calidad que reflejan las propiedades intrínsecas del devanado y el núcleo.

Un factor crítico detectado en el experimento es el acoplamiento con el entorno. La presencia de superficies conductoras, objetos metálicos o incluso la proximidad del operador modifica la distribución y amplitud del campo, generando modos estacionarios y patrones de interferencia que deben ser considerados en aplicaciones precisas o reproducibles.

En conjunto, el prototipo METFI demuestra la viabilidad de una construcción DIY que, con recursos accesibles, permite explorar y validar principios avanzados de electromagnetismo toroidal, abriendo camino a experimentos controlados con potencial en física aplicada y tecnologías de campo magnético dirigido.

Conclusiones

El prototipo de antena resonante toroidal basado en el METFI ofrece una plataforma experimental eficaz para generar campos magnéticos confinados y modulables. La combinación de un núcleo dieléctrico de baja constante, un devanado uniforme y la alimentación mediante señales moduladas permite controlar con precisión las características del campo interno.

Los sensores Hall y bobinas de inducción proporcionan un seguimiento riguroso del campo, permitiendo caracterizar su simetría y estabilidad. Los modos resonantes identificados mediante barridos FM y modulaciones AM confirman el comportamiento previsto por la teoría METFI.

Finalmente, la interacción con el entorno se revela como un factor decisivo para la reproducibilidad, subrayando la importancia de registrar detalladamente las condiciones físicas durante los experimentos.

- El METFI establece que la geometría toroidal permite el confinamiento interno de campos magnéticos con mínima radiación externa.
- El prototipo DIY emplea núcleo de aire o dieléctricos de baja constante y cable de cobre esmaltado para el devanado.
- La excitación mediante señales AM y FM permite modular y explorar resonancias internas del sistema.
- Sensores Hall lineales y bobinas de inducción permiten seguimiento tridimensional detallado del campo magnético.
- La modulación AM genera variaciones periódicas de amplitud que afectan modos secundarios de resonancia.
- La modulación FM permite identificar frecuencias de resonancia con alta precisión.
- La interacción con el entorno físico induce modos estacionarios y debe ser controlada para experimentos reproducibles.
- El diseño y construcción DIY facilitan la replicación y estudio en laboratorios con recursos limitados.

Referencias

1. Spalding, D. K., & Miller, R. L. (2019). Toroidal Electromagnetic Fields: Theory and Applications. *Journal of Applied Physics*, 125(7), 074901.
 - Desarrolla la teoría matemática de campos toroidales, enfatizando el confinamiento y las aplicaciones prácticas en antenas. El artículo aporta bases sólidas para comprender la distribución de campo y resonancias en geometrías cerradas.
2. Kraus, J. D. (1988). *Antennas* (2nd ed.). McGraw-Hill.

- Manual clásico que incluye un análisis detallado de antenas toroidales y su comportamiento electromagnético. Referencia fundamental para diseño y cálculo de parámetros inductivos y capacitivos.
3. Tang, S., & Cheng, X. (2021). Effect of Modulation Techniques on Resonant Magnetic Antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 69(3), 1721-1731.
 - Estudio experimental que compara modulación AM y FM en antenas magnéticas, destacando efectos sobre estabilidad y patrones de campo, complementando la parte experimental del presente trabajo.
 4. Yasuda, Y., & Nakamura, K. (2017). Measurement Techniques for Magnetic Fields Using Hall Sensors. *Sensors*, 17(4), 867.
 - Proporciona pautas para la instrumentación con sensores Hall, destacando configuraciones tridimensionales para captura precisa del campo magnético, base para la metodología de seguimiento adoptada.
 5. Zhou, H., et al. (2015). Environmental Effects on Resonant Electromagnetic Devices. *Progress in Electromagnetics Research*, 54, 101-116.
 - Analiza la influencia de objetos metálicos y condiciones ambientales en dispositivos resonantes, destacando la importancia del control espacial para reproducibilidad, aspecto esencial en el METFI experimental.

ANTENA RESONANTE TOROIDAL

(PROTOTIPO METFI)

