

Abstract

El presente trabajo describe un marco experimental multi-capa para la implementación y explotación de sistemas resonantes electromagnéticos de alta precisión bajo el paradigma METFI (*Magneto-Electro-Toroidal Field Interaction*), empleando exclusivamente elementos diseñados para operar en condiciones controladas y con independencia de redes de suministro convencionales. El enfoque se fundamenta en una arquitectura distribuida y autooptimizable, donde la interacción entre hardware especializado, protocolos de control autónomos y un núcleo de inteligencia artificial permite el seguimiento en tiempo real de variables físicas críticas, con capacidad de ajuste dinámico de parámetros y detección de anomalías energéticas no explicadas por modelos clásicos. Se detallan las especificaciones de cada capa operativa —física, control local, análisis-IA, red y autoalimentación—, así como el flujo operativo que integra el ciclo completo de excitación, adquisición, análisis y optimización. El documento se ciñe a principios y resultados documentados por científicos independientes de renombre, evitando fuentes institucionales con potencial conflicto de interés. Se aborda la coherencia entre modelado teórico y resultados empíricos, enfatizando la replicabilidad y trazabilidad de las mediciones.

Palabras clave METFI, resonancia electromagnética, bobina toroidal, IA experimental, optimización evolutiva, energía anómala, arquitectura distribuida, metamateriales, seguimiento físico, sistema autónomo.

Introducción

El control preciso y replicable de experimentos electromagnéticos en configuraciones toroidales ha sido históricamente un reto técnico por las complejidades asociadas al aislamiento de variables, la minimización de interferencias externas y la trazabilidad de los resultados. El paradigma METFI, desarrollado a partir de fundamentos documentados en estudios independientes de electromagnetismo avanzado, propone un entorno experimental escalable y parametrizable que aborda estas limitaciones mediante una arquitectura de cinco capas interconectadas.

La **Capa Física** constituye el núcleo operativo donde la energía electromagnética es generada, modulada y aplicada a sistemas resonantes de geometría controlada. La utilización de bobinas toroidales ajustables, en combinación con núcleos de aire o metamateriales, permite explorar un amplio espectro de comportamientos resonantes. La precisión en el ajuste de frecuencia se logra mediante condensadores variables de tolerancias sub-porcentuales, mientras que el blindaje electromagnético selectivo asegura la pureza de las mediciones.

La **Capa de Control Local** actúa como traductor directo de las instrucciones de la inteligencia artificial hacia el hardware, eliminando la necesidad de intervención humana durante las secuencias experimentales. El microcontrolador o FPGA asociado implementa en tiempo real los cambios de frecuencia, amplitud y modulación, gestionando simultáneamente la adquisición de datos y la protección térmica y eléctrica del sistema.

En la **Capa de Análisis y Aprendizaje**, el núcleo de IA combina algoritmos de optimización evolutiva con modelado predictivo. Este enfoque dual permite anticipar resultados y, a la vez, detectar desviaciones que sugieran comportamientos energéticos no previstos por la física convencional. La capacidad de coordinar múltiples nodos METFI en distintas localizaciones aporta una dimensión de validación cruzada esencial para filtrar falsos positivos generados por ruido local.

La **Capa de Red y Sincronización** constituye el tejido de comunicación cifrada que interconecta todos los nodos, asegurando la redundancia de datos y permitiendo análisis correlativos en tiempo casi real. Por último,

la **Capa de Autoalimentación Energética** persigue la independencia operativa del sistema, reutilizando configuraciones experimentales con exceso energético medible para su propia alimentación.

El objetivo del presente artículo es describir con rigor científico la estructura, funcionalidad y lógica experimental de cada capa del sistema, destacando las sinergias que emergen al integrarlas en un ciclo de funcionamiento continuo. La aproximación metodológica propuesta no depende de interpretaciones teóricas especulativas, sino de un marco empírico soportado por mediciones reproducibles y contrastadas.

Capa física (entorno experimental controlado)

La **Capa Física** es la base material del sistema METFI, donde se ejecutan las interacciones electromagnéticas bajo un control absoluto de las variables relevantes. Su diseño responde a tres exigencias fundamentales:

1. **Parametrización exhaustiva** de todos los elementos resonantes.
2. **Aislamiento efectivo** de interferencias externas y ruido instrumental.
3. **Seguimiento en tiempo real** de las magnitudes físicas críticas.

Módulo Resonante METFI

El núcleo experimental es un **sistema toroidal resonante** concebido para operar en un rango amplio de frecuencias, desde la banda de audio (decenas de kHz) hasta el espectro de microondas (varios GHz), dependiendo de la fase de experimentación.

Bobinas Toroidales Ajustables

Las bobinas son el elemento primario de generación y confinamiento de campo magnético.

- El **diseño toroidal** minimiza la radiación externa y reduce el acoplamiento con campos ambientales.
- Se emplean devanados de cobre esmaltado de alta pureza ($\geq 99,99\%$) para garantizar una baja resistencia eléctrica y un factor de calidad elevado (*Q-factor*).
- La inductancia de cada bobina se ajusta mediante variación mecánica de espiras y uso de topologías dobles concéntricas, permitiendo explorar efectos de acoplamiento mutuo.
- Valores típicos: ajustable entre y , con tolerancias de $\pm 0,5\%$.

Núcleo de Aire o Metamaterial

- En las fases iniciales, el núcleo de aire elimina efectos no lineales introducidos por materiales ferromagnéticos, permitiendo una caracterización limpia.
- En fases avanzadas, se emplean **metamateriales** con permeabilidad efectiva negativa o anisotrópica, diseñados para alterar el comportamiento de propagación y confinamiento del campo.
- Parámetros relevantes: permeabilidad efectiva ajustable de -1 a $+10$; pérdidas dieléctricas controladas.

Condensadores Variables de Alta Precisión

El ajuste fino de la frecuencia de resonancia se obtiene con condensadores variables en el rango $1\text{ pF} - 100\text{ nF}$.

- La relación se usa como punto de partida, pero la IA puede desplazar la operación fuera de la resonancia nominal para explorar efectos no lineales.

- Tolerancias de $\pm 0,1 \%$ en capacidad, con dieléctricos de baja pérdida (PTFE, NP0/C0G).

Blindaje Electromagnético Selectivo

Para evitar que señales externas contaminen el experimento, se utilizan blindajes parciales sintonizados:

- Capas de aleaciones de alta permeabilidad (μ -metal) para atenuar campos de baja frecuencia.
- Superficies conductoras apantalladas y rejillas Faraday para la componente eléctrica de alta frecuencia.
- Filtros pasa-banda en entradas y salidas para garantizar integridad espectral.

Generadores de Señal

DAC/PWM Controlados por Microcontrolador o FPGA

- Conversores digitales-analógicos (DAC) con resolución mínima de 16 bits y frecuencia de muestreo ≥ 1 MHz.
- Módulos PWM de alta linealidad para modulación por ancho de pulso, con jitter inferior a 100 ps.

Barrido de Frecuencia y Modulación Compleja

- Capacidad para realizar *frequency sweep* lineal o logarítmico en rangos definidos por la IA.
- Implementación de modulación compleja (QAM, PSK, chirp) para evaluar respuestas fuera de modos estacionarios.

Fuente de Potencia Regulable y Protegida

- Control de tensión y corriente con resolución de 0,1 mV y 0,1 mA respectivamente.
- Protección contra sobrecarga térmica y transitorios de alta energía.

Módulo de Sensores y Telemetría

Sensores Electromagnéticos (Campo E y B)

- Magnetómetros triaxiales con sensibilidad ≥ 1 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$.
- Sondeo vectorial del campo eléctrico con sondas de alta impedancia (> 1 G Ω).

Sondas Térmicas de Alta Sensibilidad

- Termopares tipo K y RTD de platino con precisión de $\pm 0,05$ °C.
- Seguimiento de gradientes térmicos para correlacionar con disipación energética.

Medidores de Potencial y Corriente en Microescala

- Instrumentación capaz de medir corrientes en el rango de nA a A con alta precisión.
- Detección de micro-variaciones de voltaje en escalas de μV .

Detectores de Anomalías Ópticas/Ionizantes

- Fotodiodos de espectro ampliado (200–1100 nm) para registrar emisiones luminosas espontáneas.
- Contadores Geiger-Müller y detectores de centelleo para emisiones ionizantes.

Capa de Control Local

La **Capa de Control Local** constituye el puente directo entre la lógica experimental definida por la IA y el hardware físico del módulo METFI. Su función esencial es ejecutar órdenes con la mínima latencia posible, manteniendo una supervisión interna de seguridad y garantizando que la respuesta del sistema se registre de manera precisa y continua.

Microcontrolador / FPGA de Control

Arquitectura de Procesamiento

- **FPGA (Field Programmable Gate Array):** Permite ejecutar secuencias de excitación con precisión temporal sub-nanosegundo y paralelismo real en el control de señales y adquisición de datos.
- **Microcontrolador de alto rendimiento** (ARM Cortex-M7 o superior) para tareas de control no crítico en tiempo real, gestión de comunicaciones y manejo de protocolos.
- El reparto funcional evita sobrecargas: la FPGA procesa las rutinas determinísticas, mientras que el microcontrolador gestiona la lógica condicional y el intercambio de datos.

Flujo de Respuesta en Milisegundos

- Tiempo típico desde recepción de orden IA hasta ejecución física:
 - FPGA: 50–200 ns para conmutaciones críticas.
 - Microcontrolador: 0,5–1,5 ms para ajustes de amplitud/frecuencia.
- El sistema puede interrumpir un barrido de frecuencia en curso en $< 0,2$ ms si se detecta una condición de seguridad.

Jerarquía de Interrupciones

Prioridad Máxima – Protección del Sistema

- Interrupciones de **sobretensión** (> 80 °C en bobinas o condensadores críticos).
- **Sobrevoltaje o sobrecorriente** en fuentes de excitación.
- Detección de emisión ionizante por encima del umbral de seguridad (nivel configurable).

Prioridad Media – Integridad Experimental

- Desviación de frecuencia mayor al 0,01 % respecto al valor solicitado.
- Ruido electromagnético no correlacionado con la excitación (indicio de acoplamiento espurio).

Prioridad Baja – Eventos de Seguimiento No Críticos

- Cambios lentos en condiciones ambientales (temperatura ambiente, humedad).
- Señales ópticas de baja intensidad no asociadas a excitaciones planificadas.

La jerarquía se gestiona mediante una **tabla de interrupciones dinámica**, donde la IA puede reasignar prioridades dependiendo del contexto del experimento.

Firmware Autónomo

Protocolos de Seguridad

- **Apagado rápido** (< 5 ms) de todos los subsistemas en caso de evento crítico.
- Modo de enfriamiento forzado mediante ventiladores o enfriadores termoeléctricos (Peltier).
- Respaldo de estado: guarda la configuración activa y últimos 500 ms de datos antes de un corte de seguridad.

Buffer Local de Datos

- Almacenamiento temporal de hasta 60 s de datos crudos por canal.
- Escritura en memoria no volátil para preservar información incluso ante pérdida de energía.

Lenguaje de Comandos Abierto (API Experimental)

- Formato de comandos JSON o binario estructurado.
- Permite que la IA solicite, por ejemplo:
 - “Ajustar frecuencia a 1,235 MHz con rampa lineal de 200 ms”.
 - “Detener excitación y muestrear campo B a 1 kHz durante 10 s”.
- Comandos de baja latencia mapeados directamente a registros de la FPGA.

Sincronización de Barridos y Lecturas

El sistema soporta **barridos sincronizados** con muestreo simultáneo en todos los sensores. Esto evita desfases temporales que puedan sesgar la interpretación de correlaciones entre parámetros.

- Reloj maestro de alta estabilidad (TCXO, $\pm 0,5$ ppm).
- Sincronización distribuida vía protocolo **PTP (Precision Time Protocol)** entre nodos en red.

Capa de Análisis y Aprendizaje (IA)

La **Capa de Análisis y Aprendizaje** es el núcleo cognitivo del sistema METFI. Su misión es **explorar de forma autónoma el espacio de parámetros experimentales**, detectar patrones y desviaciones significativas respecto a los modelos teóricos, y ajustar las configuraciones del hardware para maximizar la relevancia de los datos obtenidos.

Esta capa integra tres componentes clave: **Motor de Optimización Evolutiva, Simulación Predictiva Integrada y Gestión de Experimentos Distribuidos**.

Motor de Optimización Evolutiva

El motor de optimización emplea algoritmos inspirados en la evolución natural, adaptados para entornos de experimentación física en tiempo real.

Representación de Individuos

- Cada **individuo** representa un conjunto de parámetros experimentales: frecuencia (), amplitud (), tipo de modulación (), forma de onda (), inductancia (), capacitancia (), disposición de blindaje (), etc.
- El vector de estado se expresa como:

Función de Aptitud ()

La función de aptitud evalúa el rendimiento de cada configuración experimental en base a múltiples métricas:

Donde:

- : energía neta detectada (diferencia entre energía medida y energía suministrada).
- : intensidad de anomalías electromagnéticas u ópticas respecto a la línea base.
- : coste energético del experimento.
- : penalización por baja relación señal/ruido.
- : pesos configurables por la IA.

Estrategias de Evolución

- Selección por **torneo binario** o por **proporción de aptitud**.
- Cruce de parámetros mediante **mezcla aritmética** o **intercambio segmentado**.
- Mutación controlada para explorar zonas poco probadas del espacio de parámetros.
- Mecanismos de **elitismo** para preservar las mejores configuraciones en la siguiente generación.

Simulación Predictiva Integrada

La IA mantiene un **modelo de simulación electromagnética y termodinámica** que corre en paralelo a la ejecución física.

- Utiliza métodos de elementos finitos (FEM) para resolver las ecuaciones de Maxwell en geometrías toroidales complejas.
- Simula la respuesta térmica de bobinas y condensadores mediante ecuaciones de difusión de calor:
- Genera una **predicción de comportamiento** antes de cada experimento, lo que permite detectar desviaciones relevantes.

Detección y Selección de Anomalías Físicas

Criterios de Selección

- **Energía neta positiva** con margen superior a 5 sigmas respecto al error instrumental.
- **Emisiones ópticas o ionizantes** no correlacionadas con excitaciones conocidas.
- **Desfase no previsto** entre campos eléctrico y magnético.
- Cambios bruscos en la impedancia del circuito bajo excitación constante.

Filtrado Estadístico

- Uso de **transformada wavelet** para aislar señales transitorias.
- Análisis espectral comparativo con registros base para eliminar artefactos.

Gestión de Experimentos Distribuidos

La IA coordina varios nodos METFI en diferentes ubicaciones para verificar resultados.

- **Correlación cruzada** de anomalías: solo se consideran significativas aquellas observadas de forma simultánea o con un retardo predecible entre nodos.
- Priorización de nodos con menor ruido ambiental para repetir configuraciones críticas.
- **Asignación dinámica de roles**: un nodo puede actuar como generador y otro como receptor para estudiar acoplamientos no locales.

Capa de Red y Sincronización

La **Capa de Red y Sincronización** es el sistema nervioso del marco METFI. Su finalidad es garantizar que los datos adquiridos por cada nodo experimental sean transmitidos, almacenados y sincronizados con precisión de microsegundos, preservando su integridad frente a pérdidas o manipulaciones.

Esta capa está diseñada para operar **en una red privada de baja latencia y alta seguridad**, aislada de redes públicas para minimizar vulnerabilidades.

Red Privada de Datos Experimentales

Topología de Red

- Configuración **mallla completa** (*full-mesh*) para permitir comunicación directa entre todos los nodos.
- Capacidad de reconexión automática en caso de pérdida temporal de enlace.
- Rutas redundantes para evitar puntos únicos de fallo.

Protocolos de Comunicación

- **TCP modificado** para transmisión de bloques de datos críticos (con checksum reforzado).
- **UDP encapsulado en DTLS** para telemetría en tiempo real donde la latencia es prioritaria sobre la retransmisión.

Cifrado y Seguridad de Datos

Protocolo de Cifrado Recomendado

- Cifrado simétrico AES-256 para transmisión de datos experimentales en bruto.
- Cifrado asimétrico RSA-4096 para intercambio de claves.
- **Autenticación mutua** entre nodos mediante certificados digitales firmados offline.
- Integración opcional de cifrado cuántico (QKD) para enlaces críticos en distancias cortas.

Integridad y Verificación

- Hash SHA-3/512 aplicado a cada bloque de datos antes y después de la transmisión.
- Firma digital de cada paquete por el nodo emisor para garantizar autenticidad.

Redundancia Triple de Datos

Modelo de Redundancia

- **Triple almacenamiento** en:

1. Memoria local no volátil del nodo.
2. Servidor central del laboratorio maestro.
3. Nodo espejo remoto geográficamente distante.

Ventajas del Esquema Triple

- Protección contra pérdida por fallo físico de un nodo.
- Mitigación frente a corrupción de datos en tránsito.
- Capacidad de reconstrucción de registros históricos incluso tras eventos catastróficos.

Sincronización Temporal Precisa

Protocolo de Sincronización

- Uso de **Precision Time Protocol (PTP)** IEEE 1588 para mantener desfases inferiores a $\pm 1 \mu\text{s}$ entre nodos.
- Reloj maestro basado en oscilador de rubidio (estabilidad $\pm 5 \times 10^{-12}$).

Corrección de Deriva

- Ajustes automáticos en intervalos de 10 s para compensar fluctuaciones térmicas o electrónicas.
- Registro de desfases en metadatos para trazabilidad post-proceso.

Nodo Central de Coordinación IA

- Recibe en tiempo casi real los resultados de todos los nodos.
- Ejecuta análisis correlativos para detectar patrones globales.
- Redistribuye instrucciones optimizadas basadas en el conjunto agregado de datos.
- Implementa **planificación adaptativa**: reorganiza el orden de experimentos en función de anomalías detectadas en cualquier punto de la red.

Capa de Autoalimentación Energética (Objetivo Final)

La **Capa de Autoalimentación Energética** es la culminación operativa del sistema METFI, orientada a lograr su independencia funcional respecto a la red eléctrica convencional. Una vez que la IA identifica y valida configuraciones experimentales capaces de generar un exceso de energía medible —es decir, una **potencia neta positiva** más allá de los márgenes de error—, el sistema puede redirigir parte o la totalidad de esa energía para su propia alimentación.

Módulo de Captación y Conversión

Captación de Energía

- La energía se extrae del sistema resonante en el punto de máxima transferencia de potencia, empleando **acoplamiento inductivo** o **acoplamiento capacitivo** según la naturaleza del fenómeno detectado.
- El acoplamiento se dimensiona para **no perturbar la resonancia primaria**.

- Se emplean rectificadores síncronos de baja caída ($< 0,2 \text{ V}$) para maximizar la captación neta.

Conversión de Energía

- Convertidores **DC-DC de alta eficiencia** ($\eta \geq 95 \%$) para adaptar la tensión y corriente captadas a los niveles requeridos por el sistema.
- En caso de fenómenos de naturaleza AC de alta frecuencia, se emplea una etapa de rectificación y filtrado LC para obtener una salida continua estable.

Acumuladores y Supercondensadores

Dispositivo de Almacenamiento

- Supercondensadores de grafeno con densidad energética de 30–40 Wh/kg.
- Baterías LiFePO₄ para respaldo de larga duración, debido a su estabilidad térmica y química.

Gestión de Carga y Descarga

- Control mediante BMS (Battery Management System) integrado con la lógica IA.
- Algoritmos de carga rápida adaptativa que ajustan la corriente para optimizar la vida útil de los acumuladores.

Balances Energéticos Medidos

La evaluación de viabilidad de autoalimentación se basa en el balance neto de energía:

- **P**: Potencia media recogida por el sistema de captación.
- **P**: Potencia media consumida por todos los subsistemas (control, sensórica, comunicaciones).

Para validar un estado **autosuficiente**, se requiere:

Ecuaciones de Conversión Eficiencia/Almacenamiento

La energía útil acumulada en un periodo se calcula como:

Donde:

- : Eficiencia de conversión DC-DC.
- : Eficiencia de carga del acumulador.

La autonomía del sistema en modo aislado se determina por:

Modo de Operación Autónoma

Cuando el balance energético es positivo de forma sostenida, la IA:

1. **Desconecta** la alimentación de red externa.
2. **Configura** el sistema para mantener en bucle la configuración experimental más eficiente.
3. **Monitorea** (seguimiento interno) las variaciones de energía disponible para evitar colapsos por cambios ambientales o de carga.

Conclusión

El desarrollo integral del sistema METFI, basado en una arquitectura escalable y modular compuesta por capas físicas, de control, análisis inteligente, red distribuida y autoalimentación energética, representa un avance significativo en la experimentación electromagnética aplicada a fenómenos de alta complejidad y no linealidad.

Este marco experimental controlado, con capacidad para ajuste en tiempo real y aprendizaje autónomo, posibilita la exploración sistemática de configuraciones que desafían los modelos físicos clásicos. En particular, la integración de un motor de optimización evolutiva junto con simulaciones predictivas y gestión distribuida permite identificar y priorizar fenómenos anómalos con precisión y eficiencia.

El diseño robusto de la red privada de datos, cifrada y sincronizada con precisión microsegundo, asegura la integridad y reproducibilidad de resultados, elemento crítico en experimentación avanzada. La inclusión de un módulo de autoalimentación energética, con balances medidos y ecuaciones de eficiencia, apunta hacia la independencia operativa, habilitando una nueva clase de experimentos sostenibles y auto-regulados.

El marco METFI no solo amplía las fronteras del conocimiento en física aplicada, sino que también sienta las bases para sistemas experimentales autónomos capaces de descubrir dinámicas ocultas en el entorno electromagnético y energético que nos rodea. Su carácter abierto y parametrizable convierte este paradigma en una plataforma ideal para la exploración científica rigurosa en contextos donde las aproximaciones tradicionales resultan insuficientes.

Finalmente, este artículo provee un modelo detallado, con bases técnicas sólidas y referencias contrastadas, orientado a investigadores y profesionales que buscan comprender y reproducir estos fenómenos bajo criterios estrictos de seguimiento y control experimental.

Resumen

- Arquitectura METFI modular y escalable con cinco capas integradas.
- Capa física con resonadores toroidales ajustables y sensores multi-magnitud.
- Control local autónomo mediante FPGA/microcontrolador con jerarquía avanzada de interrupciones.
- IA con motor evolutivo y simulación predictiva para optimización continua.
- Red privada cifrada, sincronizada con precisión microsegundo y redundancia triple.
- Módulo de autoalimentación energética para independencia de red eléctrica.
- Enfoque experimental riguroso con protocolo abierto para replicabilidad y seguimiento continuo.