

Abstract

El presente trabajo describe, con un enfoque de alta precisión y rigor técnico, la implementación de un sistema de oscilación controlada digitalmente para experimentos en el marco del Modelo Electromagnético Toroidal de Forzamiento Interno (METFI). El sistema se basa en microcontroladores de arquitectura abierta, específicamente Arduino y ESP32, para generar, modular y gestionar señales eléctricas capaces de excitar bobinas, resonadores o antenas configuradas según los principios electromagnéticos del METFI.

Se detalla la arquitectura funcional de osciladores con capacidad de generación multiforma de onda (sinusoidal, cuadrada y triangular/diente de sierra), modulación AM y FM, y control de frecuencia ajustable desde 0.1 Hz hasta 5 MHz, sujeto a las limitaciones de hardware y técnicas de amplificación complementaria. Se aborda la integración con sistemas de seguimiento y registro ambiental (temperatura, humedad, campo electromagnético), así como el flujo de datos hacia entornos de análisis como MATLAB y Python.

La propuesta metodológica contempla tanto la interacción física con dispositivos de salida (bobinas resonantes toroidales, circuitos LC, antenas de experimentación), como la retroalimentación informada por sensores ambientales, con el fin de correlacionar variaciones en el comportamiento del sistema con factores externos. Se incluyen directrices de diseño para garantizar estabilidad, aislamiento y fidelidad de señal, respaldadas por fundamentos teóricos y prácticos sustentados en la literatura científica de referencia, evitando el uso de fuentes con conflictos de interés.

Palabras clave: METFI, osciladores controlados digitalmente, Arduino, ESP32, modulación AM/FM, resonadores LC, bobinas toroidales, seguimiento ambiental, generación de señal, electrónica experimental, física aplicada.

Introducción y contexto físico del METFI

El Modelo Electromagnético Toroidal de Forzamiento Interno (METFI) describe un marco experimental y teórico en el que el acoplamiento entre fuentes de oscilación controlada y estructuras inductivas-toroidales permite inducir, modular y analizar campos electromagnéticos cerrados de alta estabilidad. Su formulación surge de la convergencia entre la electrodinámica clásica, la física de resonancia y la ingeniería de sistemas embebidos, encontrando puntos de contacto con estudios históricos y contemporáneos de investigadores como Nikola Tesla, Konstantin Meyl y Eric

Dollard, todos ellos reconocidos por su independencia académica y ausencia de compromisos con entidades reguladoras que pudieran condicionar sus resultados.

La particularidad del METFI radica en que, a diferencia de configuraciones electromagnéticas tradicionales, persigue optimizar la simetría de campo y minimizar pérdidas radiativas no deseadas mediante la disposición toroidal del conductor, logrando un confinamiento energético que favorece interacciones resonantes internas y un alto grado de coherencia de fase. Esto posibilita la experimentación en rangos de frecuencia que, dependiendo de la topología de la bobina y el circuito de excitación, abarcan desde bajas frecuencias subhercianas hasta escalas de megahercios, siempre manteniendo control preciso sobre la señal inyectada.

En este contexto, los osciladores controlados digitalmente juegan un papel central. Su función no se limita a generar una señal eléctrica arbitraria, sino que se orienta a producir patrones de excitación adaptados al comportamiento dinámico del resonador. Para ello, resulta imprescindible contar con una electrónica flexible, de bajo coste y alta reconfigurabilidad, lo que convierte a plataformas como Arduino y ESP32 en candidatos idóneos para aplicaciones METFI.

Desde una perspectiva física, el toroidal resonante actúa como un sistema que almacena energía en su campo magnético interno y la intercambia con el circuito de excitación en ciclos que dependen de la inductancia, capacitancia y resistencia efectiva del conjunto. La calidad del factor Q de este resonador, así como la estabilidad en frecuencia de la señal de entrada, determinan la eficiencia y selectividad del acoplamiento. En configuraciones METFI bien optimizadas, el control sobre fase y amplitud adquiere relevancia comparable a la frecuencia, ya que un desajuste de fase de pocos grados puede implicar pérdidas energéticas o desplazamientos de la resonancia fuera de la banda objetivo.

Este enfoque experimental ha sido objeto de atención por parte de la física aplicada no convencional, especialmente en lo relativo a la interacción de campos confinados con el entorno, abriendo la puerta a la exploración de fenómenos no lineales y acoplamientos cruzados con variables ambientales. De ahí que el diseño propuesto incluya, además del sistema generador, un conjunto de sensores para seguimiento en tiempo real, posibilitando la correlación directa entre el comportamiento del campo y factores como temperatura, humedad y variaciones del campo electromagnético local.

A diferencia de sistemas pasivos de resonancia, el METFI propone un forzamiento activo con realimentación informada, es decir, una inyección de señal ajustada dinámicamente en base a parámetros medidos, lo que permite mantener el sistema en su punto de máxima eficiencia incluso ante cambios en las condiciones externas o en las propiedades internas del resonador.

Marco teórico de osciladores en aplicaciones electromagnéticas toroidales

Fundamentos de oscilación controlada

En términos físicos, un oscilador es un sistema capaz de producir una señal periódica estable a partir de una fuente de energía constante. En el contexto METFI, el oscilador debe cumplir con dos requisitos esenciales:

1. Estabilidad en frecuencia y amplitud para no introducir variaciones indeseadas en la excitación del resonador.
2. Flexibilidad de forma de onda y modulación para permitir barridos, pulsos y ajustes dinámicos de excitación.

Los microcontroladores modernos, como Arduino y ESP32, ofrecen la capacidad de generar señales digitales que, tras filtrado y amplificación adecuados, se convierten en excitaciones analógicas precisas. Esta señal puede adoptar formas sinusoidales (máxima suavidad en la transferencia energética), cuadradas (alta velocidad de conmutación para excitación por armónicos) o triangulares/diente de sierra (idóneas para análisis espectral y barridos de resonancia).

Acoplamiento resonante en estructuras toroidales

El toroide es una geometría que minimiza la radiación electromagnética hacia el exterior, confinando el campo magnético dentro del núcleo. Desde la perspectiva de Maxwell, la estructura se comporta como un circuito inductivo cerrado en el que las líneas de campo se autorreconducen. Esto implica dos ventajas clave para el METFI:

- Alta eficiencia en el almacenamiento de energía magnética, lo que permite ciclos de carga-descarga controlados.
- Reducción de interferencias externas, mejorando la relación señal/ruido.

La frecuencia de resonancia de un toroidal excitado se determina por:

donde L es la inductancia efectiva del devanado y la capacitancia total del circuito (interna + externa). La resistencia efectiva introduce pérdidas y determina el factor de calidad Q :

Un Q elevado indica menor amortiguamiento y mayor selectividad de resonancia, lo cual es crítico en experimentos donde se persigue mantener la coherencia de fase y maximizar el acoplamiento energético.

Modulación como herramienta de exploración

La modulación de amplitud (AM) permite variar la intensidad del campo inyectado, reproduciendo condiciones dinámicas y facilitando la observación de respuestas no lineales en el resonador. La modulación de frecuencia (FM) desplaza la excitación alrededor de la resonancia central, siendo útil para caracterizar la curva de respuesta y detectar cambios en el punto resonante debidos a variaciones ambientales o internas.

En la práctica METFI, la AM y FM se pueden implementar directamente desde el microcontrolador o, para mayor fidelidad, mediante un módulo externo de modulación analógica. La precisión temporal y la linealidad de la modulación son esenciales, ya que cualquier distorsión introduce componentes armónicas que pueden enmascarar o alterar el fenómeno que se desea estudiar.

Interacción con el entorno y seguimiento

Aunque el toroide reduce el acoplamiento con el exterior, no lo elimina por completo. Factores como cambios de temperatura, humedad y variaciones en el campo electromagnético local pueden modificar las propiedades eléctricas del circuito, alterando la inductancia, la capacitancia y las pérdidas resistivas.

Por ello, el sistema debe incorporar sensores de temperatura (p.ej., DS18B20), humedad relativa (DHT22 o SHT31) y campo electromagnético (sensores Hall como el MLX90393 o magnetómetros de tres ejes como el HMC5883L). Estos datos, integrados en tiempo real con el control del oscilador, permiten compensaciones activas o, como mínimo, correlaciones experimentales fiables.

Relevancia dentro del METFI

La clave del forzamiento interno radica en mantener una relación constante y controlada entre el oscilador y el resonador, de modo que la energía electromagnética circula en ciclos auto-reforzados. Un desfase no controlado o un cambio brusco en amplitud rompe esta coherencia, degradando el efecto toroidal confinado.

El marco teórico aquí expuesto define por qué el diseño del oscilador no es un accesorio, sino un elemento crítico del sistema METFI. Su correcta implementación determina la capacidad de reproducir y estudiar fenómenos electromagnéticos con alta fidelidad experimental.

Diseño e implementación de osciladores Arduino/ESP32 para METFI

Selección de plataforma de control

En el marco METFI, la elección del microcontrolador es una decisión estratégica que depende de los requerimientos de frecuencia, resolución y flexibilidad de comunicación:

- Arduino Uno / Nano (ATmega328P)

- Frecuencia de reloj: 16 MHz.
- Ventajas: arquitectura muy estable, extensa documentación, gran comunidad.
- Limitaciones: generación directa de señales limitada a unos cientos de kHz sin hardware adicional.

- ESP32

- Frecuencia de reloj: hasta 240 MHz.
- Doble núcleo, WiFi y Bluetooth integrados.
- Ventajas: alta velocidad de procesamiento, generación de PWM de alta resolución, conectividad inalámbrica nativa.
- Ideal para implementaciones METFI donde el seguimiento remoto y la transmisión de datos en tiempo real son esenciales.

Generación de formas de onda

Las tres formas de onda fundamentales descritas en la propuesta original requieren distintos enfoques de implementación:

1. Sinusoidal:

- En Arduino: uso de tablas de valores precomputados y salida mediante convertor DAC externo (p.ej., MCP4921) o modulación PWM con filtrado RC.
- En ESP32: generación mediante DAC interno (8/10 bits) o PWM de alta resolución.

2. Cuadrada:

- Directamente generada con temporizadores internos (tone() en Arduino, ledcWriteTone() en ESP32).

- Ventaja: mínima latencia y alta estabilidad.

3.Triangular/diente de sierra:

- Implementación digital con incremento/decremento de valores DAC.
- Alternativamente, generación de onda triangular analógica mediante integrador operacional controlado digitalmente.

Control de frecuencia

La estabilidad en frecuencia es crítica en METFI para mantener el acoplamiento resonante. El control puede implementarse de varias maneras:

- Ajuste manual: potenciómetro conectado a entrada analógica para mapear su posición a la frecuencia de salida.
- Control digital preciso: entrada desde interfaz gráfica en PC (Python GUI, MATLAB App Designer) vía USB o WiFi.
- Barrido programado (frequency sweep): útil para encontrar automáticamente la frecuencia de máxima respuesta del resonador.

Implementación de modulación AM y FM

- AM (Amplitud Modulada):
 - En PWM: variación del ciclo de trabajo (duty cycle) en tiempo real.
 - En DAC: multiplicación digital de la señal portadora por una señal moduladora predefinida.
- FM (Frecuencia Modulada):
 - Modificación dinámica del valor de temporizador o incremento de índice en tablas de onda.
 - Especialmente útil en ESP32, que permite variaciones rápidas sin comprometer estabilidad.

Etapas de amplificación

Dado que las salidas de Arduino o ESP32 no entregan corriente suficiente para excitar directamente una bobina resonante de aplicación METFI, se requiere una etapa intermedia:

- Amplificador de potencia clase AB o clase D, según eficiencia y pureza espectral deseada.

- Aislamiento mediante transformador o driver MOSFET para protección del microcontrolador.
- Posibilidad de integrar un control de ganancia en lazo cerrado, ajustando la amplitud de excitación en función de la respuesta medida.

Integración con sensores de seguimiento

Para correlacionar condiciones ambientales y respuesta del sistema:

- Temperatura: sensor digital DS18B20 (precisión $\pm 0,5$ °C).
- Humedad: sensor SHT31 (precisión ± 2 % HR).
- Campo electromagnético: sensor Hall lineal (p.ej., ACS712 para intensidad o MLX90393 para campo magnético puro).
- Adquisición sincronizada con el ciclo de generación de onda, de forma que los datos ambientales se registren junto a parámetros de excitación.

Sincronización hardware–software

- Comunicación USB: Protocolo serial simple para envío de comandos y lectura de datos.
- Comunicación inalámbrica (ESP32): protocolo TCP/IP para integración con MATLAB o Python vía WiFi, o uso de esp_now para baja latencia en redes locales.
- Visualización en tiempo real:
 - MATLAB: serialport() para adquisición y plot() para graficado dinámico.
 - Python: librerías como pyserial y PyQtGraph para interfaz interactiva.

Integración hardware–software y arquitectura funcional METFI

Visión de conjunto de la arquitectura

La arquitectura propuesta para un prototipo METFI controlado por microcontrolador se organiza en capas funcionales:

1. Generación de señal (nivel de control digital): microcontrolador (Arduino/ESP32) encargado de generar la forma de onda, controlar la modulación (AM/FM) y ejecutar secuencias programadas (barridos, pulsos, sincronización multi-oscilador).

2. Conversión y filtrado DAC / PWM: conversor digital-analógico o PWM de alta resolución con etapa de filtrado pasa-bajo para obtener una forma de onda analógica de baja distorsión cuando se requiere sinusoidal.
3. Etapa de amplificación y adaptación de impedancia: amplificador de potencia y/o driver MOSFET que proporcione la potencia requerida por la bobina toroidal; inclusión de transformadores o acoplamientos para aislamiento galvanico cuando proceda.
4. Red resonante (bobina toroidal/resonador LC): el elemento experimental, con posibilidad de ajuste de capacitancia (bank de condensadores) para afinamiento fino de .
5. Sensores de seguimiento: sensores de temperatura, humedad y campo magnético colocados estratégicamente para muestreos sincronizados.
6. Adquisición y visualización: transmisión de datos a PC o servidor para análisis en MATLAB o Python, visualización en tiempo real y registro para posterior análisis.

Esta organización modular permite independencia entre bloques —por ejemplo, optimizar la etapa de amplificación sin reprogramar el microcontrolador— y facilita la replicabilidad experimental.

Flujo de señal y sincronización temporal

El flujo operativo típico en un experimento METFI es:

- El microcontrolador inicializa parámetros (frecuencia, amplitud, forma de onda, perfil de modulación).
- Se activa la generación de señal; simultáneamente se marca una referencia temporal (timestamp) para sincronización.
- La señal analógica resultante excita la bobina/resonador; los sensores toman muestras en instantes definidos y envían valores al microcontrolador.
- Los datos son empaquetados y transmitidos al host (PC/servidor).
- Si se usa lazo de retroalimentación activa, el host o el propio microcontrolador procesa las lecturas y modifica parámetros de excitación en tiempo real para mantener condiciones experimentales (p. ej., mantener fase o compensar drift térmico).

La precisión temporal de la sincronización depende del reloj del microcontrolador y de la latencia de comunicación. Para experimentos sensibles a la fase, se recomiendan

osciladores de referencia estables (cristales de cuarzo de baja deriva o fuentes de reloj externas) y la minimización de latencias en la cadena de adquisición.

Protocolos de comunicación y formatos de datos

- Serial (USB): simple y robusto; paquetes con etiqueta de tiempo y campos CSV o JSON son adecuados para la mayoría de usos experimentales.
- WiFi (ESP32): uso de sockets TCP o HTTP POST para envío a endpoints; MQTT para telemetría y sistemas distribuidos.
- Formato de datos: se recomienda un esquema con timestamp (UTC), id de experimento, parámetros de señal (f , A , forma, modulación), y vectores de sensores. Esto facilita la trazabilidad y el post-procesado.

Aplicaciones experimentales específicas dentro de METFI

Mapeo de la respuesta de resonancia (characterization sweep)

Objetivo: determinar , ancho de banda y Q del toroidal en condiciones experimentales.

Procedimiento resumido:

- Configurar un barrido de frecuencia (sweep) controlado por el microcontrolador o por el host, irradiando la bobina con una señal de amplitud controlada.
- Medir la amplitud de la respuesta (mediante sensor de campo o caída de voltaje en un punto de sentido) y registrar la curva.
- Calcular y Q a partir de la respuesta en frecuencia (p. ej., a través del método - 3 dB).

Importancia: la caracterización precisa permite establecer los puntos de operación para estudios de acoplamiento y forzamiento interno.

Experimentos de acoplamiento fase-dependiente

Se trata de explorar cómo variaciones pequeñas en la fase entre osciladores múltiples o entre la señal de excitación y la respuesta del resonador afectan la transferencia de energía y la estabilidad del estado toroidal.

Implementación:

- Uso de dos (o más) osciladores sincronizables con referencia compartida.

- Ajuste fino de desfase mediante retardo digital o control de fase en hardware.
- Medición simultánea de la potencia absorbida y de la forma de la señal en puntos críticos.

Resultados esperables: identificación de condiciones de sincronía que maximizan o minimizan energía almacenada, aparición de modos no lineales o multiestables cuando se superan ciertos umbrales de amplitud/phase locking.

Estudios de impacto ambiental y correlación

Con la inclusión de sensores de seguimiento, es posible correlacionar variaciones en o en Q con variables ambientales (temperatura, humedad, campo EM cercano). Esto permite:

- Compensaciones en tiempo real (si se activa lazo) para mantener condiciones experimentales.
- Construcción de modelos empíricos de dependencia ambiental para mejorar reproducibilidad.

Técnicamente, se sugiere realizar análisis estadístico multivariado sobre registros temporales (p. ej., análisis de correlación cruzada, regresión multivariante) para identificar factores predictores del drift o de transitorios.

Protocolo experimental propuesto (metodología reproducible)

Preparación y calibración

- Verificar continuidad en el devanado toroidal y ausencia de cortocircuitos.
- Medir inductancia L del devanado con LCR meter y calcular necesaria para el deseado.
- Calibrar conversor DAC o PWM con osciloscopio: verificar distorsión, THD y linealidad en rango operativo.
- Calibrar sensores (temperatura, humedad, magnetómetro) con patrones de referencia cuando sea posible.

Ensayo básico de seguridad y verificación

- Incluir fusibles y limitadores de corriente en la fuente de alimentación.
- Probar etapas de potencia a baja amplitud antes de elevar a potencias experimentales completas.

- Verificar aislamiento y puesta a tierra para evitar loops que introduzcan ruido.

Ejecución de experimentos y registro

- Ejecutar barridos de frecuencia completos con muestreo de al menos 10–20 puntos por ancho de banda estimado.
- Para experimentos de fase, muestrear múltiples valores de desfase con integración temporal para reducir ruido.
- Registrar metadatos: fecha, hora, versión de firmware, calibraciones y configuraciones de hardware.

Procesado y análisis

- Filtrado de datos (p. ej., mediana, promedio móvil) para eliminación de picos esporádicos.
- Ajuste de curvas de resonancia por métodos de regresión no lineal para estimar Q con incertidumbre.
- Análisis de sensibilidad frente a variables ambientales con regresión multivariante o análisis de componentes principales (PCA) cuando proceda.

Consideraciones de diseño, reproducibilidad y seguridad experimental

Diseño eléctrico y de potencia

- Selección de transistores y drivers con margen térmico adecuado; prever disipación y ventilación.
- Minimizar loops de masa en el trazado para disminuir acoplamientos parásitos.
- Uso de condensadores de desacople lo más cerca posible de los pines de alimentación del microcontrolador y drivers.

Integridad de señal y mitigación de ruido

- Filtrado analógico (pasa-bajo) posterior a DAC/PWM para reducir contenido armónico.

- Blindaje parcial del circuito de potencia para reducir emisiones hacia el entorno experimental, respetando el objetivo de la configuración toroidal (evitar modificar la topología del campo).
- Cableado de medición con apantallamiento y, cuando sea necesario, uso de sondas diferenciales para osciloscopio.

Seguridad eléctrica y límites operacionales

- Definir límites de operación seguros (corriente máxima, temperatura) en firmware y en la interfaz de control.
- Incorporar apagado por sobrecorriente y por temperatura (watchdogs térmicos).
- Documentar claramente riesgos y procedimientos de emergencia en el protocolo experimental.

Ética experimental y responsabilidad

- Mantener registro completo de experimentos para reproducibilidad.
- Evitar afirmaciones no sustentadas sobre efectos que no hayan sido reproducidos y analizados estadísticamente.
- Compartir esquemas y firmware de forma que otros laboratorios puedan reproducir y verificar resultados.

Conclusión

Se ha presentado un marco técnico riguroso para la implementación de osciladores controlados por microcontrolador (Arduino / ESP32) orientados a experimentación dentro del Modelo Electromagnético Toroidal de Forzamiento Interno (METFI). El texto ha cubierto desde fundamentos teóricos sobre resonadores toroidales y Q, hasta la ingeniería práctica de generación de formas de onda, etapas de amplificación, integración de sensores para seguimiento y protocolos experimentales reproducibles.

Los puntos críticos de éxito son: cuidado en la caracterización del resonador, control preciso de frecuencia y fase, diseño robusto de la etapa de potencia, y un sistema de adquisición y registro que permita correlacionar cambios en el comportamiento del METFI con variables ambientales. La modularidad propuesta favorece iteración experimental, replicación por terceros y la mejora progresiva de la fidelidad de la señal.

- METFI se fundamenta en el uso de bobinas toroidales para confinar campos magnéticos y optimizar la coherencia resonante.
- Los microcontroladores Arduino y ESP32 permiten generación flexible de formas de onda y modulación (AM/FM), pero requieren DAC/filtrado y etapa de potencia para aplicaciones experimentales serias.
- La calidad del resonador (Q) y la estabilidad de frecuencia/phase son parámetros críticos que determinan la eficacia del forzamiento interno.
- Sensores de temperatura, humedad y campo magnético integrados permiten seguimiento en tiempo real y compensaciones o correlaciones experimentales.
- Protocolos de barrido y de experimentos fase-dependientes son procedimientos básicos para caracterizar comportamiento y acoplamientos.
- Diseño cuidadoso de la etapa de potencia, gestión térmica y aislamiento galvanico son esenciales para seguridad y reproducibilidad.
- El uso de formatos de datos estandarizados y timestamps facilita análisis posterior y reproducibilidad por terceros.

Referencias

1.J. D. Jackson — Classical Electrodynamics (3ª ed.)

- Resumen: Texto de referencia sobre teoría electromagnética a nivel avanzado. Cubre fundamentos de ondas electromagnéticas, cargas y corrientes distribuidas, y principios que subyacen al comportamiento de resonadores y acoplamiento inductivo.
- Por qué lo recomiendo: marco teórico robusto para entender campos y acoplamientos en sistemas complejos.

2.D. M. Pozar — Microwave Engineering (texto clásico sobre guías de ondas y resonadores)

- Resumen: Proporciona herramientas prácticas y teóricas para el diseño y análisis de resonadores, acoplamientos y redes a alta frecuencia — conceptos aplicables a la caracterización de resonadores toroidales en bandas altas.
- Por qué lo recomiendo: metodología de análisis de resonancia, Q y adaptación de impedancia.

3.C. A. Balanis — Antenna Theory: Analysis and Design

- Resumen: Cobertura extensiva de teoría de antenas, radiación, y métodos de análisis; aporta comprensión sobre las condiciones que minimizan la radiación (útil para interpretar el comportamiento de estructuras toroidales).
- Por qué lo recomiendo: ayuda a comprender cómo estructuras cerradas como toroidales reducen emisión y cómo evaluar acoplamientos.

4.A. Sedra & K. C. Smith — Microelectronic Circuits

- Resumen: Tratamiento profundo de etapas de amplificación, drivers y técnicas de diseño analógico necesarias para implementar la etapa de potencia y filtros del sistema METFI.
- Por qué lo recomiendo: base para seleccionar topologías de amplificación que preserven la fidelidad espectral.

5.Documentación técnica y datasheets (sensores y periféricos):

- DS18B20 (sensor de temperatura digital): datasheet del fabricante para especificaciones de precisión y uso.
- SHT31 / SHT3x (Sensirion) (sensor de humedad/temperatura): especificaciones de calibración y precisión.
- MLX90393 (Melexis) o equivalentes (magnetómetro/IMU): detalles de resolución y rango de medida.
- Resumen: las hojas de datos ofrecen los parámetros técnicos (precisión, rango, tiempo de respuesta) necesarios para diseñar el muestreo y conocer incertidumbres en el seguimiento ambiental.

6.Manual/Guía de Espressif (ESP32) y documentación de Arduino (ATmega328P)

- Resumen: describen capacidades de PWM, DAC, timers, APIs de comunicación y consideraciones de uso. Son referencias prácticas para la implementación del firmware y la comunicación con el host.
- Por qué lo recomiendo: fuente primaria para funciones y limitaciones de los microcontroladores usados.

