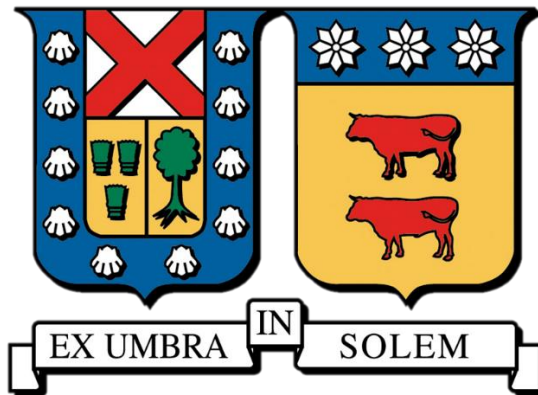


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA

VALPARAÍSO – CHILE



SIMULACIÓN DE UN GENERADOR DE CAMPOS MAGNÉTICOS PROGRAMABLE

JUAN CARLOS SEPÚLVEDA BECERRA

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
ELECTRÓNICO**

PROFESOR GUÍA: ALEJANDRO SUÁREZ SOTOMAYOR

PROFESOR CO-REFERENTE: IVAN CHOQUE SERRANO

ENERO – 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Simulación de un generador de campos magnéticos programable

Nombre del candidato(a): Juan Carlos Sepúlveda Becerra

Carrera / Grado: Ingeniero Civil Electrónico

Campus: Central Departamento: Electrónica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Alejandro Suárez Sotomayor, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 04-marzo-2026 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 03-Marzo-2026 Firma: Juan C. Sepúlveda Becerra

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

DEDICATORIA

Para un ingeniero de la Universidad Técnica Federico Santa María, una dedicatoria representa mucho más que una formalidad. Es el espacio donde, por un momento, se dejan de lado los circuitos, el código y las ecuaciones, para dar paso a la palabra sincera, aquella que nace desde la experiencia, el esfuerzo y el corazón.

Dedico este trabajo, en primer lugar, a mis padres, quienes fueron los primeros en creer en mis capacidades cuando la ingeniería era solo un sueño lejano. Gracias por los sacrificios silenciosos, por las palabras de aliento en los momentos de frustración y por enseñarme, con el ejemplo, que la perseverancia es el motor de cualquier gran proyecto. Este título es, ante todo, un testimonio de su entrega, de su confianza inquebrantable y del amor con el que me formaron como persona.

A la Universidad Técnica Federico Santa María, mi alma mater, que me acogió en sus aulas y me desafió constantemente a superar mis propios límites. Gracias por forjar en mí no solo el conocimiento técnico propio de la ingeniería civil electrónica, sino también el carácter, la disciplina y la resiliencia necesarios para enfrentar los desafíos de la vida profesional. Valparaíso, sus cerros y sus pasillos serán siempre el escenario donde comprendí el verdadero valor del esfuerzo y la excelencia.

De manera muy especial, dedico este trabajo y el cierre de esta etapa a mis hermanos, que han sido mi puerto seguro en medio de las tormentas académicas. Gracias por comprender las largas noches de estudio, por tu paciencia infinita frente a mis ausencias y por brindarme la contención emocional que me permitió seguir adelante cuando el camino se tornó cuesta arriba.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas aquellas personas que hicieron posible la realización de esta memoria de título, tanto en el ámbito académico, personal, así como también a Dios, por el apoyo y la fortaleza brindados durante este proceso.

En primer lugar, agradezco sinceramente a mi profesor guía, quien, con su experiencia, paciencia y constante orientación, me entregó las herramientas necesarias para enfrentar los desafíos de esta investigación. Su apoyo fue fundamental para avanzar con claridad en cada una de las etapas del proyecto.

A mi familia, gracias por su amor incondicional, comprensión y constante motivación durante todo este proceso. En especial, a mis padres, por creer en mí incluso en los momentos más complejos, y por brindarme siempre el soporte emocional y material que necesité.

A mis amigos y compañeros de carrera, quienes me acompañaron durante estos años de estudios, compartiendo aprendizajes, esfuerzos y buenos momentos. Su apoyo fue clave para mantener el ánimo y la perseverancia.

Finalmente, agradezco a todos los docentes de la carrera de Ingeniería Civil Electrónica, quienes aportaron con sus conocimientos y compromiso a mi formación profesional.

A todos, gracias por ser parte de este camino.

RESUMEN

Esta memoria presenta el diseño y la validación, mediante simulación, de un generador de campos magnéticos programable orientado a estudios experimentales sobre la interacción de campos ELF (Extremely Low Frequency) con material vegetal. El trabajo integra fundamentos teóricos del electromagnetismo con el diseño práctico de una cadena de señal digital–analógica, implementada mediante un microcontrolador, conversión DAC, filtrado, amplificación y selección de bobinas, todo verificado en el entorno de simulación Proteus 8.11 versión educacional.

Desde el punto de vista teórico, se revisan los principios de generación de campo magnético a partir de corrientes eléctricas (Ley de Biot–Savart, autoinducción y reactancia inductiva), así como la influencia de parámetros como la frecuencia, la amplitud y la geometría de la bobina sobre la distribución espacial del campo. También se abordan los límites operativos y las consideraciones de seguridad en experimentos con exposición electromagnética, junto con el marco de referencia experimental aplicable a estudios en el rango ELF.

En cuanto al diseño, la unidad generadora de campo se organiza en siete etapas funcionales:

- (E1) Selector digital de frecuencia (dip-switch en Puerto 1).
- (E2) Microcontrolador AT89C51 encargado de leer la selección y generar la secuencia de muestras a partir de una tabla senoidal.
- (E3) Conversor digital–analógico (DAC0808 o red R–2R).
- (E4) Filtro pasabanda de reconstrucción para atenuar armónicos no deseados.
- (E5) Etapa de acondicionamiento y amplificación.
- (E6) Fuente de corriente para alimentación de la bobina de ensayo.
- (E7) Instrumentación para adquisición y verificación (osciloscopio, sonda de corriente y analizador lógico).

El documento justifica la selección de componentes, detalla el dimensionamiento básico de los filtros y expone las estrategias utilizadas para garantizar señales de alta fidelidad y seguridad eléctrica.

La validación del sistema se llevó a cabo mediante simulación interactiva en Proteus 8.11 (versión educacional), integrando el archivo *.hex* del firmware del microcontrolador AT89C51 junto con modelos de convertidores digital–analógico, amplificadores operacionales y bobinas. Las simulaciones permitieron cuantificar la relación entre el valor digital de entrada y la frecuencia de salida, verificar la correcta reconstrucción de la onda senoidal tras la etapa de filtrado y evaluar la respuesta en corriente de la bobina frente a distintas frecuencias y amplitudes de excitación.

Asimismo, se incluyeron métricas de calidad de forma de onda junto con indicadores de estabilidad temporal y el análisis del comportamiento bajo distintas condiciones de carga en la etapa de potencia.

Los resultados obtenidos confirman la viabilidad técnica del prototipo, demostrando que el sistema es capaz de generar señales senoidales de frecuencia ajustable dentro del rango ELF, con control por software y conmutación de bobinas mediante un multiplexor. Finalmente, se discuten las limitaciones inherentes al entorno de simulación, asociadas principalmente a modelos idealizados de bobinas y a la ausencia de efectos de pérdidas térmicas, y se proponen líneas de trabajo futuro, tales como la construcción experimental del prototipo, la caracterización del campo magnético mediante gaussímetro y la realización de ensayos biológicos controlados que permitan correlacionar los parámetros del campo con indicadores fisiológicos en plantas.

ABSTRACT

This thesis presents the design and simulation-based validation of a programmable magnetic field generator intended for experimental studies on the interaction of extremely low frequency (ELF) electromagnetic fields with plant material. The work integrates theoretical fundamentals of electromagnetism with the practical design of a digital-to-analog signal chain, implemented using a microcontroller, DAC conversion, filtering, amplification, and coil selection, all verified within the Proteus 8.11 educational simulation environment.

From a theoretical perspective, the document reviews the principles of magnetic field generation from electric currents (Biot–Savart law, self-induction, and inductive reactance), as well as the influence of parameters such as frequency, amplitude, and coil geometry on the spatial distribution of the magnetic field. Operational limits and safety considerations for electromagnetic exposure experiments are also addressed, together with the experimental framework applicable to studies in the ELF range. Regarding the design, the field generation unit is organized into seven functional stages:

- (E1) Digital frequency selector (DIP switch on Port 1).
- (E2) AT89C51 microcontroller responsible for reading the selection and generating the sample sequence from a sinusoidal lookup table.
- (E3) Digital-to-analog converter (DAC0808 or R–2R ladder network).
- (E4) Reconstruction band-pass filter for the attenuation of unwanted harmonics.
- (E5) Signal conditioning and amplification stage.
- (E6) Current source for driving the test coil.
- (E7) Instrumentation for acquisition and verification (oscilloscope, current probe, and logic analyzer).

The document justifies the component selection, details the basic filter design, and presents the strategies employed to ensure high-fidelity signals and electrical safety. System validation was carried out through interactive simulation in Proteus 8.11 (educational version), integrating the .hex firmware file of the AT89C51 microcontroller

together with models of digital-to-analog converters, operational amplifiers, and coils. The simulations made it possible to quantify the relationship between the digital input value and the output frequency, verify the proper reconstruction of the sinusoidal waveform after filtering, and evaluate the coil current response under different excitation frequencies and amplitudes.

In addition, waveform quality metrics were included, such as total harmonic distortion with temporal stability indicators and analysis of system behavior under different load conditions in the power stage.

The results confirm the technical feasibility of the prototype, demonstrating that the system is capable of generating sinusoidal signals with software-controlled, adjustable frequency within the ELF range, as well as coil commutation via a multiplexer. Finally, the limitations inherent to the simulation environment—mainly related to idealized coil models and the absence of thermal loss effects—are discussed, and future work is proposed, including experimental construction of the prototype, magnetic field characterization using a gaussmeter, and the execution of controlled biological experiments to correlate field parameters with physiological indicators in plants.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	IV
ABSTRACT.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
ÍNDICE DE ECUACIONES	XII
CAPÍTULO 1.INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO.....	1
CAPÍTULO 2.PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	3
2.1 Justificación	3
2.2 Objetivo general	4
2.3 Objetivos específicos.....	5
2.4 Alcances y limitaciones.....	5
2.5 Estructura de la tesis.....	6
CAPÍTULO 3.MARCO TEÓRICO	7
3.1 Fundamentos de campos electromagnéticos	8
3.1.1 Campo magnético estático	8
3.1.2 Campo de frecuencia extremadamente baja (ELF)	9
3.1.3 Campo de radiofrecuencia (RF) y microondas	9
3.1.4 Relación entre corriente, número de vueltas y distancia	10
3.2 Aplicaciones de campos magnéticos en crecimiento vegetal y control de plagas.....	10
3.2.1 Estimulación del crecimiento, germinación y salud de plantas	11
3.2.2 Control de plagas, insectos, hongos y nematodos	16
3.3 Dispositivos generales de campos	22
3.3.1 Selección de parámetros del Campo.....	22
3.3.2 Elección de Microcontrolador AT89C51	24
3.3.3 Diseño del circuito	27
3.4 Software de Simulación	28
3.4.1 Gestión de archivos de simulación en Proteus.....	29
3.4.2 Diferencia entre los archivos .hex y .mcu8051ide	30
3.4.3 Construcción del prototipo	32

3.4.3.1 Medición y calibración	32
3.4.3.2 Seguridad y consideraciones prácticas	32
CAPÍTULO 4.UNIDAD GENERADORA DE CAMPO.....	34
4.1 Descripción general del sistema.....	34
4.2 Etapa E1: Selector de frecuencias	34
4.3 Etapa E2: Microcontrolador	35
4.4 Etapa E3: Conversor Análogo Digital (DAC)	39
4.5 Etapa E4: Filtro	41
4.6 Etapa E5: Amplificador	44
4.7 Etapa E6: Fuente de Corriente	46
4.8 Etapa E7: Bobina generadora de campo magnético	47
CAPÍTULO 5.RESULTADOS DE SIMULACIÓN.....	52
5.1 Etapa E1: Selector de Frecuencias	53
5.2 Etapa E2: Microcontrolador	54
5.3 Etapa E3: Conversor Digital Análogo	55
5.4 Etapa E4: Filtro	57
5.5 Etapa E5: Amplificador	58
5.6 Etapa E6 y E7: Fuente de corriente y Bobina Generadora de Campos Magnéticos	60
CAPÍTULO 6.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	63
6.1 Conclusiones generales del proyecto.....	63
6.2 Recomendaciones para futuras implementaciones.....	64
6.3 Propuestas de mejora	65
CAPÍTULO 7.REFERENCIAS	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1: Equipo industrial de microondas para desinfestar suelo, desarrollado en Corea, que aplica campos de 2,45 GHz focalizados para eliminar plagas subterráneas mediante calentamiento en sitio [11].	16
Figura 4.1: Diagrama de bloques del generador de campos magnéticos programable.	34
Figura 4.2: AT89C51 encapsulado en línea doble (Dual In-Line Package, DIP)[19].	35
Figura 4.3: Programa de prueba - Generar frecuencia variable	38
Figura 4.4: DAC0808 (a) Diagrama de bloques (b) encapsulado en línea doble [24].	39
Figura 4.5: Respuesta en frecuencia de filtro pasabanda.	41
Figura 4.6: Simulación en LTspice de la etapa E2 Filtro.	43
Figura 4.7: Amplificador de voltaje.	44
Figura 4.8: Fuente de corriente controlada utilizando amplificador operacional.	46
Figura 5.1: Simulación generador de campos magnéticos programable.	52
Figura 5.2 Implementación de E1 Selector de Frecuencias.	53
Figura 5.3: Implementación de E2 Microcontrolador	54
Figura 5.4: Conexión Microcontrolador/DAC/Corriente-Voltaje	55
Figura 5.5: Corriente de salida del DAC a (a) 4.9Hz y (b) 123Hz, y Voltaje de Salida del Amplificador de Transimpedancia a (c) 4.9Hz y (d) 123Hz.	56
Figura 5.6: Filtro Pasabanda conformado por una parte (a) Pasa-altos y (b) Pasa-bajos.	57
Figura 5.7: Voltaje de Salida del Filtro (a) 4.9Hz y (b) 123Hz.	58
Figura 5.8: Amplificador no inversor.	59
Figura 5.9: Voltaje de Salida del Filtro (a) 4.9Hz y (b) 123Hz.	60
Figura 5.10: Amplificador de Transconductancia.	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Efectos observados por Campo Magnético y Campo ELF	14
Tabla 3.2: Efectos observados Radiofrecuencia y Microondas	15
Tabla 3.3: Resumen de efectos de distintos campos electromagnéticos en semillas y plantas.....	20
Tabla 3.4: Resumen de efectos de distintos campos electromagnéticos en semillas y plantas (2).	21
Tabla 3.5 Descripción de los archivos generados en un proyecto de Proteus	30
Tabla 3.6: Comparación entre los archivos .hex y .mcu8051ide	31
Tabla 4.1: Distribución de pines del microcontrolador AT89C51 (DIP40).	36
Tabla 5.1: Combinaciones de switches y su valor correspondiente para la rutina DELAY	55

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ec (3.1).....	8
Ec (3.2).....	8
Ec (3.3).....	9
Ec (3.4).....	9
Ec (3.5).....	9
Ec (3.6).....	9
Ec (3.7).....	10
Ec (4.1).....	40
Ec (4.2).....	40
Ec (4.3).....	42
Ec (4.4).....	43
Ec (4.5).....	44
Ec (4.6).....	45
Ec (4.7).....	45
Ec (4.8).....	45
Ec (4.9).....	45
Ec (4.10).....	45
Ec (4.11).....	45
Ec (4.12).....	45
Ec (4.13).....	45
Ec (4.14).....	47
Ec (4.15).....	47
Ec (4.16).....	47
Ec (4.17).....	48
Ec (4.18).....	48
Ec (4.19).....	49
Ec (4.19).....	50

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO

Durante las últimas décadas, el estudio de los efectos de los campos magnéticos sobre organismos vivos ha adquirido creciente relevancia en disciplinas como la biotecnología, la agricultura y la medicina. Este interés ha sido impulsado por el desarrollo de tecnologías capaces de generar campos magnéticos de manera precisa, programable y reproducible, lo que permite realizar investigaciones en entornos controlados y con alta fiabilidad experimental.

En este contexto, la presente memoria se enmarca en el ámbito de la ingeniería aplicada y tiene como propósito el diseño y simulación de un generador de campos magnéticos controlado electrónicamente. El sistema propuesto integra microcontroladores, conversores digital–analógicos, filtros, amplificadores y dispositivos de conmutación de bobinas, organizados en una arquitectura modular que posibilita ajustar parámetros físicos como frecuencia, amplitud y orientación del campo.

La elección de este tema responde tanto al interés académico por desarrollar soluciones innovadoras en electrónica de control, como a la necesidad práctica de disponer de herramientas de bajo costo y alto rendimiento para investigar el impacto de los campos magnéticos de muy baja frecuencia (ELF, *Extremely Low Frequency*) sobre especies vegetales. En particular, se busca contribuir al estudio de posibles efectos bioestimulantes y de control de plagas, mediante la exposición de plantas a campos magnéticos generados en condiciones reproducibles y controladas.

El objetivo central de este trabajo es diseñar y validar, mediante simulación en el entorno Proteus 8.11, un sistema generador de campos magnéticos programable. El diseño contempla el uso de un microcontrolador AT89C51, un conversor DAC0808, filtros pasabanda, una etapa de amplificación de corriente y un sistema de selección de bobinas mediante multiplexores. La señal generada corresponde a una onda senoidal modulada, cuya frecuencia puede ajustarse por software para alimentar distintas bobinas dispuestas espacialmente.

A lo largo de esta memoria se abordan los fundamentos teóricos del electromagnetismo, la conversión digital–analógica, el diseño de filtros y el acondicionamiento de señales. Asimismo, se describe la arquitectura del sistema, la lógica de programación implementada y los resultados obtenidos en las simulaciones bajo diversas condiciones de operación.

La relevancia del proyecto radica en su potencial como herramienta experimental replicable, escalable y adaptable a distintos escenarios. El diseño propuesto puede modificarse para incorporar nuevas funciones, emplear diferentes microcontroladores o integrarse en sistemas más complejos, abriendo así posibilidades para futuras investigaciones en laboratorios y centros de desarrollo tecnológico.

CAPÍTULO 2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El estudio de los efectos de los campos magnéticos sobre organismos vivos ha despertado un interés creciente en diversas disciplinas científicas. En particular, la aplicación de campos magnéticos como herramienta para estimular el crecimiento vegetal, mejorar la germinación o controlar plagas constituye una línea de investigación prometedora. No obstante, la generación controlada de estos campos en entornos experimentales requiere dispositivos electrónicos capaces de ajustar parámetros como frecuencia, intensidad y geometría del campo de forma precisa y reproducible.

En la actualidad, muchas investigaciones se ven limitadas por la falta de equipos accesibles que permitan generar campos magnéticos programables con fidelidad suficiente para estudios biológicos. La mayoría de los sistemas disponibles son costosos, de difícil implementación o carecen de la capacidad de modificar dinámicamente las condiciones de exposición. Esta limitación dificulta la exploración sistemática de los efectos de distintas configuraciones de campo sobre especies vegetales.

Por lo tanto, surge la necesidad de diseñar un sistema electrónico que permita generar campos magnéticos ajustables en frecuencia e intensidad, con capacidad de selección de bobinas y control por software, orientado específicamente a aplicaciones experimentales en el rango ELF (*Extremely Low Frequency*).

2.1 Justificación

La motivación principal de este proyecto radica en la necesidad de contar con una herramienta flexible, económica y programable que facilite la investigación experimental de los efectos de los campos magnéticos en especies vegetales. Se busca contribuir al desarrollo de tecnologías no invasivas para la estimulación del crecimiento y el control de plagas, como alternativa a métodos tradicionales que implican el uso de agroquímicos.

El diseño de un generador de campos magnéticos programable abre la posibilidad de explorar nuevas aplicaciones en agricultura, biotecnología y ciencias ambientales, mediante la exposición controlada de plantas a campos ELF. Además, la simulación

electrónica en Proteus 8.11 ofrece una plataforma robusta para validar el comportamiento del sistema antes de su implementación física, optimizando recursos y reduciendo riesgos de diseño.

Este proyecto también constituye una oportunidad de integración interdisciplinaria entre electrónica, electromagnetismo y biología experimental, fomentando el desarrollo de soluciones tecnológicas aplicadas a problemas reales.

HIPÓTESIS: *“La implementación de un sistema generador de campos magnéticos controlado electrónicamente permitirá obtener señales senoidales ajustables en frecuencia e intensidad, adecuadas para experimentos de exposición de especies vegetales a campos ELF, contribuyendo al desarrollo de herramientas experimentales accesibles y reproducibles”*

2.2 Objetivo general

Diseñar y simular un generador de campos magnéticos programable basado en un microcontrolador AT89C51, que incorpore un conversor digital–analógico (DAC0808), filtros pasabanda, una etapa de amplificación de corriente y un sistema de selección de bobinas mediante multiplexores, con el fin de controlar la intensidad y frecuencia del campo magnético generado.

Este objetivo se desarrolla progresivamente a lo largo del documento, desde el planteamiento del problema (CAPÍTULO 1) hasta la validación del diseño mediante simulaciones y el análisis de resultados (CAPÍTULO 5), culminando en las conclusiones generales del proyecto (CAPÍTULO 6).

2.3 Objetivos específicos

- Analizar los fundamentos teóricos relacionados con los campos magnéticos, su comportamiento según la frecuencia e intensidad, y los efectos que pueden producir sobre sistemas biológicos, estableciendo las bases conceptuales para el diseño del generador. (CAPÍTULO 3)
- Implementar una tabla senoidal en el microcontrolador AT89C51 que permita la generación de formas de onda controladas mediante el conversor digital–analógico DAC0808. (CAPÍTULO 4)
- Diseñar e integrar el sistema de selección de bobinas basado en multiplexores, junto con la etapa de amplificación de corriente y los filtros pasabanda, garantizando la adecuada excitación del campo magnético. (CAPÍTULO 4)
- Simular el circuito completo en el entorno Proteus 8.11, validando el funcionamiento conjunto de los módulos, el comportamiento de las señales generadas y la respuesta del sistema bajo diferentes condiciones de operación. (CAPÍTULO 5)
- Evaluar los resultados obtenidos, extraer conclusiones sobre el desempeño del sistema y proponer mejoras o futuras líneas de investigación orientadas al perfeccionamiento del generador de campos magnéticos. (CAPÍTULO 6)

2.4 Alcances y limitaciones

Este proyecto se centra exclusivamente en la etapa de diseño y simulación del sistema generador de campos magnéticos. No contempla la construcción física del prototipo ni la realización de ensayos biológicos detallados en plantas

La simulación se lleva a cabo en el entorno Proteus 8.11, utilizando modelos idealizados de componentes electrónicos y bobinas. En consecuencia, no se consideran pérdidas térmicas, efectos de saturación magnética ni influencias ambientales que podrían presentarse en una implementación real.

La señal senoidal utilizada se genera a partir de una tabla predefinida de 64 valores, lo que impone una resolución limitada en la forma de onda. Asimismo, la selección de bobinas se realiza mediante multiplexores digitales, sin incluir sistemas de realimentación ni medición de campo en tiempo real.

2.5 Estructura de la tesis

La presente memoria se organiza en siete capítulos:

- **CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN:**
Presentación del problema, motivación del estudio y descripción general del sistema propuesto y su aplicación.
- **CAPÍTULO 2 – PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN:**
Definición formal del problema, justificación del proyecto y establecimiento de los objetivos, alcances y limitaciones.
- **CAPÍTULO 3 – MARCO TEÓRICO:**
Antecedentes y teoría sobre campos magnéticos, sus efectos en sistemas biológicos y fundamentos de los componentes electrónicos utilizados.
- **CAPÍTULO 4 – UNIDAD GENERADORA DE CAMPO:**
Descripción detallada de la unidad generadora de campo, sus bloques funcionales y el diseño del circuito.
- **CAPÍTULO 5 – RESULTADOS DE SIMULACIÓN:**
Validación mediante simulación realizada en Proteus 8.11, análisis de señales y evaluación del comportamiento del sistema.
- **CAPÍTULO 6 – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:**
Conclusiones generales del proyecto, recomendaciones para futuras implementaciones y propuestas de mejora.
- **CAPÍTULO 7 – REFERENCIAS:**
Fuentes bibliográficas y documentales consultadas, se incluyen libros, artículos científicos, manuales técnicos y documentos electrónicos que respaldan el marco teórico y el diseño del sistema.

CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

El diseño de un generador de campos magnéticos programable requiere una comprensión sólida de los principios físicos que gobiernan la generación y el comportamiento de los campos electromagnéticos, así como del funcionamiento de los componentes electrónicos que posibilitan su implementación práctica. Este capítulo establece la base conceptual necesaria para sustentar el desarrollo del sistema propuesto, integrando conocimientos de electromagnetismo, electrónica analógica y digital, y aplicaciones en biotecnología.

En primer lugar, se revisan los fundamentos de la generación de campos magnéticos mediante corriente eléctrica, incluyendo leyes clásicas como Biot–Savart y Faraday, así como conceptos relevantes como autoinducción, reactancia inductiva y distribución espacial del campo. Estos principios permiten dimensionar adecuadamente las bobinas y estimar la intensidad del campo en función de parámetros como la frecuencia, la amplitud y la geometría del sistema.

Posteriormente, se analizan las aplicaciones de los campos magnéticos en organismos vegetales, destacando estudios que evidencian efectos positivos sobre la germinación, el crecimiento y la resistencia a plagas en diversas especies. Se examinan los rangos de frecuencia e intensidad utilizados en investigaciones previas, con especial énfasis en los campos ELF (Extremely Low Frequency), y se discuten los mecanismos fisiológicos propuestos para explicar estas respuestas.

Finalmente, se presentan los criterios de selección y funcionamiento de los dispositivos electrónicos que componen el sistema generador: microcontroladores, conversores digital-analógicos, filtros, amplificadores y bobinas. Se justifica el uso de cada componente en función de su rol dentro de la cadena de señal y se establecen las bases para su integración en el entorno de simulación Proteus 8.11.

Este marco conceptual proporciona los elementos necesarios para comprender el diseño del sistema, validar su funcionamiento y proyectar su aplicabilidad en estudios experimentales controlados.

3.1 Fundamentos de campos electromagnéticos

Los campos electromagnéticos se generan a partir del movimiento de cargas eléctricas, y sus características dependen de la frecuencia de la corriente que los produce. En este contexto, se pueden distinguir tres tipos principales de campos según su frecuencia:

3.1.1 Campo magnético estático

Los campos magnéticos estáticos (DC) se producen mediante imanes permanentes o bobinas atravesadas por corriente continua. La intensidad del campo B en un punto del espacio puede calcularse mediante la Ley de Biot–Savart:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{Idl \cdot \hat{r}}{r^2} \quad \text{Ec (3.1)}$$

Donde:

I : Es la corriente que circula por el conductor.

dl : Es un elemento diferencial de la trayectoria del conductor.

r : La distancia al punto donde se evalúa el campo.

$\hat{r}$: El vector unitario de posición.

μ_0 : La permeabilidad del vacío.

En el caso de una bobina circular de N vueltas y radio R , El campo en el centro se simplifica a:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{2R} \quad \text{Ec (3.2)}$$

Este tipo de campo se utiliza para experimentos donde se requiere un campo constante en el tiempo.

3.1.2 Campo de frecuencia extremadamente baja (ELF)

Los campos ELF, típicamente en el rango de 3–300 Hz (como la corriente alterna de 50–60 Hz), se generan mediante bobinas alimentadas con corriente alterna. La variación temporal de la corriente induce un campo magnético oscilante, cuya magnitud en el centro de una bobina de N vueltas y radio R puede aproximarse como:

$$B(t) = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I(t)}{2R} \quad \text{Ec (3.3)}$$

$$I(t) = I_0 \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \quad \text{Ec (3.4)}$$

Donde:

f : Es la frecuencia de la corriente

I_0 : La amplitud de a corriente

Los campos ELF son especialmente relevantes en estudios biológicos, ya que permiten evaluar la respuesta de organismos vivos a campos magnéticos de baja frecuencia.

3.1.3 Campo de radiofrecuencia (RF) y microondas

Los campos electromagnéticos de alta frecuencia, incluyendo RF y microondas, se generan mediante antenas o placas excitadas con señales alternas de alta frecuencia. En este caso, la propagación del campo incluye tanto componentes eléctricos como magnéticos oscilantes, y su estudio requiere la aplicación de las ecuaciones de Maxwell para ondas electromagnéticas:

$$\nabla E = \frac{\partial B}{\partial t} \quad \text{Ec (3.5)}$$

$$\nabla B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad \text{Ec (3.6)}$$

Donde:

E: Es el campo eléctrico,

B: El campo magnético,

J: La densidad de corriente,

ϵ_0 : La permitividad del vacío

μ_0 : La permeabilidad del vacío.

3.1.4 Relación entre corriente, número de vueltas y distancia

En todos los casos de campos generados por bobinas, la intensidad del campo magnético depende directamente de la corriente I que circula, del número de vueltas N de la bobina y de la distancia r al punto de interés. En general:

$$B \propto \frac{N \cdot I}{r} \quad \text{Ec (3.7)}$$

Esto permite dimensionar la bobina y ajustar la corriente para obtener la intensidad de campo deseada, considerando la geometría del sistema y la ubicación del objeto o muestra a exponer.

Estos fundamentos constituyen la base teórica para el diseño de generadores de campos magnéticos, incluyendo la selección de bobinas, fuentes de corriente y la validación de la intensidad del campo mediante simulación o medición directa.

3.2 Aplicaciones de campos magnéticos en crecimiento vegetal y control de plagas

El campo magnético es una manifestación del electromagnetismo, una de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza. Se genera por el movimiento de cargas eléctricas y afecta el comportamiento de otras cargas en movimiento dentro de su influencia. En aplicaciones tecnológicas, el conocimiento de los campos magnéticos permite desarrollar dispositivos de control, actuadores, motores eléctricos y sistemas de inducción.

3.2.1 Estimulación del crecimiento, germinación y salud de plantas

Los campos magnéticos (estáticos) y electromagnéticos (alternos, desde ELF hasta RF y micro-ondas) se han investigado extensamente en agricultura. A continuación, se resumen los rangos de frecuencias e intensidades (en teslas, T, o militeslas, mT) utilizados en estudios científicos, junto con tiempos de exposición, distancias típicas, especies tratadas y efectos observados, tanto para estimular el crecimiento/germinación de plantas como para el control de plagas (insectos, hongos, nematodos). Como referencia se debe tener en cuenta que el campo geomagnético natural de la Tierra es del orden de $\sim 50 \mu\text{T}$ (0,05 mT). Muchos estudios emplean campos bastante mayores que este valor de fondo [1].

Campos magnéticos estáticos (0 Hz): La magnetoprimación (pretratamiento de semillas con imanes o campos estáticos) ha mostrado acelerar la germinación y mejorar el vigor de plántulas en numerosas especies [1]. Se han probado campos estáticos en un rango amplio de intensidades, típicamente desde unos pocos mT hasta varios cientos de mT.

Por ejemplo, exponer semillas de soja a 150 – 200 mT (campo continuo) aumentó su tasa de germinación, el índice de fotosíntesis, el crecimiento y finalmente el rendimiento de la cosecha [1]. De igual forma, campos de ~ 50 – 150 mT aplicados a semillas de garbanzo (*Cicer arietinum*) incrementaron la velocidad de germinación y el crecimiento inicial de las raíces [1].

En general, campos estáticos moderados (decenas de mT) durante minutos a horas suelen ser suficientes; muchos protocolos de magnetoprimación utilizan exposiciones cortas (por ejemplo 5 – 60 minutos) a campos de 10 – 200 mT [2]. Se han reportado resultados óptimos con diferentes combinaciones de intensidad y tiempo, por ejemplo, exponer semillas por 60 min a 75 mT o 10 min a 25 mT produjo mejoras significativas en la germinación según un estudio [3].

Por lo general, las semillas se ubican muy cerca de los imanes o bobinas (a pocos centímetros o menos) para lograr la intensidad deseada; la intensidad de campo cae rápidamente con la distancia [3] (por ejemplo, en un experimento, un imán generaba ~20 mT en la pared del recipiente, pero solo ~1 mT en el centro a unos pocos cm [3]). Esto subraya la importancia de la distancia: en aplicaciones estáticas de laboratorio, las semillas se colocan típicamente entre polos magnéticos o dentro de solenoides para garantizar una exposición uniforme.

También existen los **Campos ELF (frecuencia extremadamente baja, 1 – 300Hz)** Además de campos estáticos, muchos trabajos emplean campos alternos de baja frecuencia (usualmente 50/60 Hz, la frecuencia de la red eléctrica). Estudios con campos magnéticos alternos sinusoidales de 50 – 60 Hz en intensidades desde 0,1 mT hasta 200 mT han demostrado mejoras en parámetros de crecimiento de plantas [4]. Por ejemplo, exposiciones diarias breves (del orden de 20 min/día) a campos de 50 Hz con intensidades de 20 – 60mT promovieron la germinación, el crecimiento y hasta el tamaño de frutos en cultivos de tomate en experimentos controlados [5][6]. Alternativamente, algunas investigaciones mantienen las plántulas bajo un campo ELF continuo durante días: cebada (*Hordeum vulgare*) crecida por 5 – 6 días en la oscuridad bajo un campo de 50 Hz mostró diferencias en el alargamiento del tallo respecto a testigos sin campo [7]. En semillas de trigo, aplicar campos de 50 Hz 0,05 mT por breves intervalos (20 – 40s) también tuvo efectos medibles en la tasa de germinación [8]. Estas respuestas sugieren que los campos ELF de intensidad moderada influyen en procesos iniciales (absorción de agua, actividad enzimática, división celular), similares a lo observado con campos estáticos. De hecho, se ha propuesto que campos magnéticos (estáticos o ELF) pueden aumentar la permeabilidad de membranas y la absorción de agua en la semilla, acelerando la germinación [1].

Otras **frecuencias (RF, microondas) en bioestimulación**, Aunque menos comunes, también se han explorado campos de mayor frecuencia. Por ejemplo, como alternativa física a estimulantes químicos, se han probado energías de radiofrecuencia (RF) y microondas de baja potencia para bioestimular semillas [1]. Un estudio reportó que exponer semillas a microondas de 2,45 GHz con baja intensidad (0,2 W por gramo de

semilla) durante 15 min (calentándolas suavemente hasta 40°C) promovió la germinación en ciertos casos [9]. Asimismo, se ha investigado el riego con agua magnetizada: hacer pasar el agua de riego a través de campos de 100 – 500 mT (estáticos) altera sus propiedades fisicoquímicas. Esta agua magnetizada (MW) puede mejorar la absorción de nutrientes y el crecimiento de plantas [1]. Por ejemplo, tratamientos de agua de riego con 110mT han mostrado aumentar la eficiencia en el uso de agua (rendimiento por unidad de agua) en 2 – 14% según el cultivo, además de neutralizar ligeramente la acidez del suelo [1].

La **Tabla 3.1** y **Tabla 3.2** resume ejemplos de aplicaciones de campos magnéticos/EM en diferentes cultivos, indicando el tipo de campo, rango de frecuencia e intensidad, tiempos típicos y efectos observados.

Tabla 3.1: Efectos observados por Campo Magnético y Campo ELF

Tipo de campo / frecuencia	Intensidad típica	Tiempo / distancia de exposición	Ejemplos de cultivos tratados	Efectos observados
Campo magnético estático (0 Hz) – imanes permanentes o corriente continua en bobinas	4 mT Hasta 200 – 300 mT (campo terrestre $\approx 0,05$ mT)	Minutos a horas, Usualmente pre-siembra (5 – 60 min típico). Distancia: semillas colocadas directamente entre polos magnéticos o dentro de bobinas (campo homogéneo en pocos cm)	Múltiples especies: leguminosas (soja, garbanzo, lenteja), cereales (trigo, maíz, arroz), hortalizas (pepino, tomate, pimiento), etc.	Positivos: acelera la germinación (mayor tasa y menor tiempo medio), aumenta vigorosidad de plántulas, contenido de pigmentos fotosintéticos y actividad enzimática; en algunos casos, mejora rendimiento (más biomasa, más frutos). Mecanismos propuestos: mayor absorción de agua y activación del metabolismo de la semilla [1]. Negativos: algunos estudios encontraron inhibición leve o nula mejora a intensidades altas o en ciertas variedades (Ej. reducción de crecimiento en albahaca y trigo bajo campos estáticos intensos) [1].
Campo ELF sinusoidal (50/60 Hz típico)	0,1 mT hasta 100 mT (se han probado hasta 200 mT)	Minutos diarios o exposición continua durante el crecimiento. Ejemplo: 20 min/día a 50 Hz por todo el ciclo, o constante por varios días. Distancia: plantas dentro de solenoides o cerca de bobinas alimentadas por corriente alterna (cm a decenas de cm)	Plántulas y plantas en crecimiento de trigo, maíz, tomate, arroz, árboles frutales, etc. (también aplicable a frutos cosechados para retardar maduración)	Positivos: campos alternos 50–60 Hz, 0,1–200 mT estimulan parámetros de crecimiento similares a los campos estáticos [4]. Incremento en longitud de brotes y raíces, mayor actividad fotosintética y enzimática, desarrollo inicial más rápido y, en frutales, maduración uniforme con mayor contenido de azúcares y retraso de senescencia. Ej: campos de 50 Hz (20–60 mT) aplicados a plántulas de tomate mejoraron altura y peso, y prolongaron la vida postcosecha de los frutos [4]. Negativos: exposiciones prolongadas a ciertos niveles pueden estresar a la planta; ligera reducción en longitud de tallos de trigo bajo campo ELF continuo. No todas las semillas responden igual: algunas variedades no mostraron cambios significativos [1].

Tabla 3.2: Efectos observados Radiofrecuencia y Microondas

Tipo de campo / frecuencia	Intensidad típica	Tiempo / distancia de exposición	Ejemplos de cultivos tratados	Efectos observados
Radiofrecuencias (VLF–RF, kHz a MHz) de baja potencia (bioestimulación no térmica)	1–10 MHz a bajas intensidades de campo (del orden de μT a mT)	Segundos a minutos; suele implicar pulsos cortos o irradiación antes de la siembra. Distancia: antenas o placas a pocos cm de las semillas	Algunos estudios experimentales en semillas dormantes o tratadas; hay menos literatura que con ELF. Ej: semillas expuestas a RF para estimular metabolismo sin calentamiento excesivo	Positivos: en ciertos casos se ha informado estimulación de germinación utilizando RF como alternativa a campo estático, pero los resultados son variables [1].
				Nota: estas frecuencias tienden a depositar energía en forma de calor; a baja potencia pueden actuar de manera similar a ELF pero con menor penetración uniforme [1].
Microondas (UHF, 2450 MHz) de baja intensidad (no térmico significativo)	Potencia baja (ej. 0,1–0,5 W/g de semilla, campo E ~ several V/m, B ~ μT)	Segundos a minutos, controlando que la temperatura de la semilla no supere 40 °C	Semillas de algunas hortalizas y cereales (ensayos puntuales)	Positivos: calentamiento leve controlado puede acelerar germinación o desinfectar semillas de patógenos. Ej: microondas a 2,45 GHz por 15 min elevando la temperatura a 40°C mejoró la tasa de germinación en ciertos casos [9].
				Negativos: riesgo de sobrecalentamiento y daño si no se controla; técnica menos estable que campos estáticos/ELF [10]. Nota: la evidencia general indica que pretratar semillas con campos magnéticos (estáticos o ELF) suele mejorar la germinación y el crecimiento temprano en muchos cultivos [1].

3.2.2 Control de plagas, insectos, hongos y nematodos

La evidencia indica que pretratar semillas con campos magnéticos (estáticos o ELF) suele mejorar la germinación y el crecimiento temprano en muchos cultivos, aunque los resultados dependen de la especie, intensidad y duración. Por ello, se investiga la dosificación óptima para cada caso. Esta bioestimulación electromagnética se propone como alternativa ecológica a químicos (hormonas, fertilizantes). Para el control de plagas se han empleado dos estrategias electromagnéticas principales:

- **Campos magnéticos/electromagnéticos no térmicos (estáticos o ELF):** Buscan afectar la biología de plagas (insectos u otros) sin matarlas instantáneamente, sino alterando su desarrollo, reproducción o supervivencia. Son métodos experimentales que apuntan a manejo sostenible, por ejemplo, ralentizando plagas o reduciendo su fertilidad [1] [3].
- **Campos electromagnéticos de alta frecuencia (RF/microondas) para calentamiento letal:** Aprovechan la energía de radiofrecuencia o microondas para eliminar plagas por calor (efecto similar a pasteurización). Estos métodos físicos tienen aplicaciones prácticas, especialmente en tratamientos postcosecha o desinfección de suelos, como alternativa a pesticidas químicos o fumigantes [13].

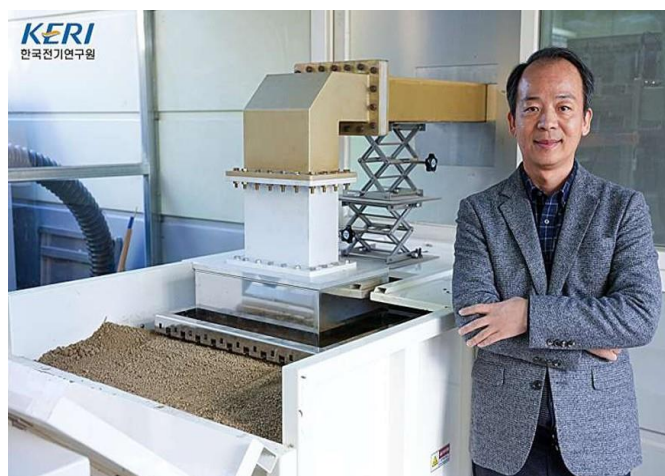


Figura 3.1: Equipo industrial de microondas para desinfestar suelo, desarrollado en Corea, que aplica campos de 2,45 GHz focalizados para eliminar plagas subterráneas mediante calentamiento in situ [11].

Ejemplos de aplicación:

- **Campos estáticos/ELF (no térmicos) en plagas:** Insectos y otras plagas expuestas a campos magnéticos intensos (decenas a cientos de mT) o ELF moderados pueden sufrir alteraciones en sus ciclos de vida. Por ejemplo, larvas de la oruga cogollera negra (*Agrotis ipsilon*) expuestas a 180 mT durante 20, 40 o 60min mostraron un desarrollo más lento: la duración de su ciclo larvario se prolongó 24% con 60min de exposición comparado con el control [12]. Además, análisis genéticos indicaron que esta exposición indujo mutaciones (polimorfismos de ADN) en las larvas, sugiriendo estrés significativo causado por el campo [12]. Otros estudios reportan efectos subletales similares en huevos de mosca de la fruta (*Drosophila melanogaster*) con campos ELF de 50 Hz y 1 mT: mayor mortalidad embrionaria y reducción de oviposición [3]. Adultos de polilla mediterránea de la harina (*Ephestia kuehniella*) presentaron menor longevidad y fecundidad bajo campos magnéticos intensos [3]. En *Ephestia cautella*, exposición de 40min a 0,1 – 0,2T inhibió completamente la emergencia de adultos. Las distancias experimentales suelen ser pequeñas: los insectos o huevos se colocan próximos a las fuentes de campo para asegurar intensidades suficientes [3].
- **Radiofrecuencia y microondas (método térmico):** Campos EM de alta frecuencia (kHz a GHz) se aplican para calentar organismos hasta niveles letales mediante absorción dieléctrica. En desinfestación postcosecha se usan frecuencias industriales como 13,56 MHz o 27,12 MHz (bandas ISM) con equipos de 3–25 kW. La energía RF eleva la temperatura interna de los insectos a 55 – 60°C en minutos, causando la muerte, mientras que el producto (grano, fruta seca) se calienta controladamente. Por ejemplo, frutos secos tratados a 27,12 MHz hasta 55°C por 5 min lograron 100% de mortalidad de *Amyelois transitella* sin afectar calidad [13][14]. En arroz infestados, RF de 27 MHz ajustada a 70°C por 150s eliminó larvas de *Corcyra cephalonica* y 180s fueron necesarios para huevos resistentes. La intensidad de campo en mT es baja (unas pocas μ T), pero la potencia entregada (varios kW) produce el efecto térmico deseado. El producto se coloca a centímetros de los electrodos/antenas para asegurar campo intenso y uniforme [15].

En suelo agrícola, donde se albergan patógenos y nematodos, se han explorado principalmente las microondas (UHF, típicamente 2450 MHz, la frecuencia de hornos microondas) para la esterilización del suelo. Las microondas penetran algunos centímetros en el suelo y calientan el agua y tejidos de plagas por efecto dieléctrico [16].

Ensayos desde los años 1970 mostraron que una irradiación con microondas de 2,45 GHz puede eliminar nematodos del suelo y semillas de malezas si se aplica la dosis adecuada. Por ejemplo, un estudio clásico reportó que con una antena de microondas de 2450 MHz se logró controlar el nematodo reniforme (*Rotylenchulus reniformis*) en campos de algodón, así como reducir la maleza verdolaga, obteniendo eficacias comparables a las del bromuro de metilo (fumigante) [11].

Típicamente, se requieren potencias del orden de 1–10 kW por metro cuadrado por unos pocos minutos para elevar la temperatura del suelo a ~ 60–70 °C en los primeros 10–20 cm de profundidad, lo que inactiva huevos de nematodos, esporas de hongos y semillas de malezas. La penetración de microondas en suelo húmedo es limitada (~10 cm) debido a la atenuación; por ello, aplicaciones tempranas sólo trataban capas superficiales (ej. control de malezas emergentes) [11].

Sin embargo, desarrollos recientes (como el equipo ilustrado arriba) utilizan arreglos de antenas y focalización de ondas para conseguir mayor penetración y tratamiento uniforme. Esto ha permitido pensar en el control de plagas subterráneas difíciles, por ejemplo, usar microondas para erradicar termitas, hormigas coloradas u otras plagas invasoras en puertos y aeropuertos, sin necesidad de excavar el suelo [11].

En cuanto a patógenos fúngicos, las microondas se han aplicado en tratamientos de desinfección de semillas y productos almacenados. Por ejemplo, exponer semillas de trigo a microondas (2,45 GHz) por breves intervalos (segundos a pocos minutos, con potencias del orden de cientos de W) redujo significativamente la carga de hongos como *Fusarium* y *Microdochium*, consiguiendo semillas prácticamente libres de estos patógenos tras el tratamiento. Este método de sanitización por microondas aprovecha que los hongos son sensibles al calor: una elevación de temperatura de ~15–20 °C en la

superficie de la semilla puede matar esporas sin comprometer la viabilidad del embrión si se controla cuidadosamente el tiempo [10].

La **Tabla 3.3 y Tabla 3.4** sintetiza ejemplos de aplicaciones de campos EM contra distintas plagas, indicando frecuencia, intensidad (cuando se informa en teslas o en términos prácticos), tiempo/distancia y efectos logrados:

Tabla 3.3: Resumen de efectos de distintos campos electromagnéticos en semillas y plantas.

Plaga / Agente tratado	Campo electromagnético aplicado	Intensidad (aprox.)	Tiempo de exposición / distancia	Efectos observados
Oruga cogollera negra (<i>Agrotis ipsilon</i>) – larvas de lepidóptero perjudicial en cultivos de maíz, etc.	Campo magnético estático (0 Hz)	180 mT	20, 40 o 60 min (exposición directa en aparato de magnetización)	Desarrollo larvario ralentizado (ciclo aumentado en +23,9 % con 60 min vs control); evidencia de daño genético (mutaciones detectadas por ISSR) que sugiere impacto en la reproducción futura. No se observa mortalidad inmediata, pero la plaga tarda más en completar su ciclo, lo que podría reducir su incidencia en campo [12].
Mosca de la fruta (<i>Drosophila melanogaster</i>) – modelo de insecto, expuesto en laboratorio	Campo ELF sinusoidal 50 Hz	1 mT	Varias horas (exposición prolongada durante desarrollo embrionario y larvario)	Mayor mortalidad de huevos y larvas; reducción de oviposición en adultos expuestos. Campos ELF débiles (1 mT) mostraron efecto tóxico sutil, pero significativo en la viabilidad y fecundidad de insectos pequeños [3].
Polillas de producto almacenado (Ej: <i>Ephestia cautella</i>, <i>E. kuehniella</i>) – estados inmaduros (huevo/ larva) en granos secos	Campo magnético estático	100–200 mT (alto flujo)	30–40 min (tratamiento de granos infestados en presencia de imán/bobina)	Inhibición total de la emergencia de adultos tras la exposición: las larvas no alcanzan fase de polilla, cortando el ciclo. Menor longevidad y fertilidad en adultos expuestos (disminuye la proliferación de la plaga) [17].

Tabla 3.4: Resumen de efectos de distintos campos electromagnéticos en semillas y plantas (2).

Plaga / Agente tratado	Campo electromagnético aplicado	Intensidad (aprox.)	Tiempo de exposición / distancia	Efectos observados
Gorgojos y larvas de insectos en granos almacenados (ej: <i>Sitophilus oryzae</i> – gorgojo del arroz; <i>Tribolium</i> – escarabajo de la harina)	Radiofrecuencia (RF) 10–30 MHz (campo EM alterno de alta frecuencia), ejemplo: 27,12 MHz, 6 kW	Calentamiento hasta 55–60 °C en el producto	Típicamente 2–10 min de tratamiento en cámaras RF (distancia: centímetros entre electrodos y producto)	Mortalidad del 100 % de insectos en todas sus etapas por choque térmico: la RF penetra el grano y calienta uniformemente los insectos hasta temperaturas letales. Desinfesta sin dañar seriamente la calidad del alimento [13][15].
Nematodos del suelo (ej: <i>Meloidogyne</i> , <i>Rotylenchulus</i> , etc.) y hongos patógenos de suelo	Microondas (UHF) 2450 MHz (banda ISM), ejemplo: 2–8 kW aplicados sobre el suelo, campo E 10 ² V/m, B uT	Calentamiento del suelo a 60–70 °C en capa de 10–20 cm de profundidad	Tiempo: 1–5 min por área tratada (según potencia y humedad). Equipos fijos o montados en vehículos, con antenas a 10 cm del suelo	Eliminación de plagas del suelo por termoterapia: microondas penetrantes esterilizan el suelo, matando nematodos, esporas de hongos (<i>Fusarium</i> , <i>Rhizoctonia</i> , etc.) y semillas de malezas resistentes. Efecto equivalente a vapor o fumigantes sin químicos. Limitación: penetración limitada (10 cm), tratamiento enfocado en capa arable superficial [10][11][16].

Como observaciones finales los campos electromagnéticos ofrecen alternativas innovadoras y ecológicas en agricultura. En estimulación vegetal, campos estáticos y ELF de magnitud entre decenas y cientos de micro teslas (hasta algunas centenas de mT) han demostrado acelerar la germinación, mejorar crecimiento y tolerancia al estrés en numerosas especies, aunque la respuesta puede variar y requiere optimización caso por caso [1].

En control de plagas, los campos no térmicos (estáticos/ELF) muestran potencial para interferir en la biología de insectos plaga (retrasando su desarrollo o reduciendo su reproducción) [3][12], mientras que las tecnologías de RF/microondas se perfilan como métodos efectivos para eliminar plagas y patógenos específicos vía calentamiento, con frecuencias de 13MHz a 2,45GHz y tiempos de exposición del orden de segundos a minutos [10][13]. Continúa la investigación para refinar estos métodos (por ejemplo, lograr mayor penetración de microondas o determinar los umbrales de campo óptimos que afecten a plagas [11], pero no a organismos benéficos). En suma, las aplicaciones de campos electromagnéticos en agricultura abarcan desde ELF hasta RF/microondas, con intensidades desde los uT hasta 102 mT en bioestimulación y con potencias de kW en métodos térmicos, ofreciendo herramientas prometedoras tanto para mejorar cultivos como para manejar plagas de forma más sostenible.

3.3 Dispositivos generales de campos

3.3.1 Selección de parámetros del Campo

La definición de los parámetros del campo electromagnético constituye un aspecto central en el diseño del generador programable, ya que determina tanto la validez experimental de los ensayos como las exigencias técnicas del sistema de generación. En el contexto de estudios sobre la interacción de campos electromagnéticos con plantas e insectos, los parámetros seleccionados deben permitir reproducibilidad, control preciso y seguridad operativa. A continuación, se describen los principales parámetros considerados. Restricciones prácticas: seguridad, disponibilidad de componentes, lugar de pruebas.

a) Frecuencia: La frecuencia del campo electromagnético es uno de los parámetros más relevantes, dado que distintos rangos de frecuencia se asocian a mecanismos de interacción diferentes. En esta memoria se consideran los siguientes rangos.

- Campo estático (0 Hz), asociado a estudios de magnetoestimulación sin variación temporal.
- Extremely Low Frequency (ELF, 50–60 Hz), ampliamente reportado en la literatura por sus efectos sobre la germinación, el crecimiento vegetal y la actividad biológica de insectos.
- Radiofrecuencia (RF, kHz–MHz), utilizada principalmente en aplicaciones de control de plagas mediante mecanismos térmicos o dieléctricos.
- Microondas (GHz), orientadas al calentamiento volumétrico de suelos o semillas para la inactivación de patógenos y organismos nocivos.

La inclusión de estos rangos permite analizar distintas aplicaciones potenciales y justifica la necesidad de un sistema de generación flexible y programable, el presente trabajo tiene como objetivo los beneficios que conlleva las frecuencias extremadamente bajas, menores a 1kHz.

b) Amplitud o intensidad del campo: La intensidad del campo magnético, expresada en teslas (T), militeslas (mT) o microteslas (μ T), influye directamente en la magnitud de la respuesta biológica observada. En estudios de estimulación vegetal, se emplean típicamente campos de baja intensidad (μ T–mT), mientras que aplicaciones de control de plagas pueden requerir niveles más elevados. El generador propuesto debe permitir el ajuste controlado de la amplitud para explorar distintos umbrales de respuesta sin comprometer la seguridad humana.

c) Duración de la exposición: El tiempo de exposición al campo electromagnético es otro parámetro crítico, ya que la respuesta biológica depende tanto de la intensidad como de la duración del estímulo. Dependiendo del protocolo experimental, las exposiciones pueden variar desde segundos o minutos, en estudios exploratorios, hasta horas o exposiciones repetidas, en ensayos de crecimiento o control biológico. Por esta razón, el sistema debe garantizar estabilidad temporal del campo durante períodos prolongados.

d) Distancia y geometría del sistema de generación: La distribución espacial del campo depende fuertemente de la distancia entre el generador y el material biológico, así como de la geometría de la bobina o antena utilizada. El diseño debe considerar el volumen de exposición requerido y la uniformidad del campo dentro del área de estudio, aspectos fundamentales para asegurar resultados reproducibles. En particular, las dimensiones de la bobina y la corriente de excitación determinan la intensidad y homogeneidad del campo aplicado.

e) Objetivo del campo aplicado: Finalmente, la selección de los parámetros del campo está condicionada por el objetivo experimental. En aplicaciones de estimulación del crecimiento vegetal, se privilegian campos de baja frecuencia e intensidad, asociados a mecanismos no térmicos. En cambio, para el control de plagas o patógenos, pueden emplearse campos de mayor frecuencia o potencia, donde predominan efectos térmicos o dieléctricos. Esta distinción influye directamente en las decisiones de diseño del generador y en las estrategias de control implementadas.

3.3.2 Elección de Microcontrolador AT89C51

Los microcontroladores siguen siendo la piedra angular de los sistemas embebidos destinados a control y generación de señales. Existen varias familias con características y objetivos distintos: los microcontroladores clásicos basados en la familia **8051** (por ejemplo, AT89C51), las familias **AVR** (ej. ATmega usados en Arduino) y las familias **ARM Cortex-M** (ej. STM32) orientadas a aplicaciones de alto rendimiento y conectividad. Cada familia propone un equilibrio distinto entre complejidad de programación, rendimiento (MIPS), consumo, periféricos integrados y ecosistema de desarrollo [18].

8051 (AT89C51). La familia MCS-51 (8051) es histórica y ampliamente documentada; microcontroladores como el AT89C51 ofrecen arquitectura de 8 bits, 4 kB de memoria de programa Flash, 128 B de RAM, 32 líneas de E/S y temporizadores/puerto serie integrados. Su diseño es CISC y su operación es muy determinista, con modos de bajo consumo y compatibilidad con numerosas herramientas y simuladores. Esto los hace

todavía comunes en labores educativas, en prototipado sencillo y en diseños donde la simplicidad y la estabilidad temporal son prioritarias [19].

AVR / Arduino (ATmega). Las MCU AVR, ampliamente usadas en las placas Arduino, siguen una arquitectura RISC optimizada para ejecutar la mayoría de las instrucciones en un ciclo de reloj. Ofrecen buena eficiencia por ciclo, herramientas modernas (Arduino IDE, ecosistema de librerías), y periféricos integrados (ADC, PWM, comunicaciones) que facilitan la implementación de cadenas señal-analógica sin tanto hardware externo. Son preferidas cuando se requieren tareas más complejas o acceso rápido a periféricos integrados [20].

ARM Cortex-M (STM32, etc.). Para aplicaciones que demandan mayor procesamiento, múltiples canales ADC/DAC, comunicaciones complejas o técnicas de control avanzadas, los microcontroladores ARM Cortex-M aportan mucho mayor rendimiento, memoria y periféricos; su curva de aprendizaje es mayor, pero proporcionan flexibilidad para proyectos avanzados y procesamiento en tiempo real de señales [21].

Para el presente proyecto, el AT89C51 es una opción razonable y defendible con base técnica y práctica por las siguientes razones:

1. **Requerimientos del experimento:** el generador necesita principalmente generar secuencias temporizadas y tablas de muestra (lookup table) para una DAC externa, con tiempos deterministas y control simple de multiplexores de bobinas, tareas en las que la arquitectura 8051 es adecuada y fiable. (Soporte funcional del AT89C51: 32 I/O, temporizadores y UART) [19].
2. **Simplicidad y trazabilidad:** para una memoria de grado es ventajoso usar una MCU con comportamiento fácilmente verificable y ampliamente documentado; la comunidad y la literatura sobre 8051 proporcionan abundantes ejemplos y recursos para implementación y validación. Además, Proteus y otros simuladores tienen modelos maduros del AT89C51 [22].

3. **Costo y disponibilidad:** el AT89C51 es económico y está disponible en encapsulados DIP/PDIP, lo que facilita pruebas de laboratorio y montaje de prototipos. Esto es valioso para propuestas que contemplan la construcción experimental posterior a la simulación [23].
4. **Limitaciones reconocidas y mitigación:** dado que el AT89C51 carece de ADC/DAC integrados y tiene memoria limitada, en tu diseño es razonable emplearlo como controlador digital que gestione una cadena D/A externa (por ejemplo, DAC0808 o red R-2R) y utilice buffers/etapas de acondicionamiento en la salida – enfoque ya común en implementaciones educativas e industriales con 8051[19].

Al elegir el AT89C51, se debe tener en consideración las ventajas y desventajas de este microcontrolador, para que cuando sea la aplicación se puedan encontrar las razones de las problemáticas que se puedan presentar

Ventajas

- Simplicidad y robustez del conjunto de instrucciones 8051, adecuado para diseños deterministas.
- Bien documentado y con abundante material didáctico y ejemplos, fácil de integrar en simuladores como Proteus.
- Suficiente para tareas de generación de secuencias digitales y control temporal como por ejemplo tablas senoidales, muestreos y envío a un DAC externo.

Desventajas

- Arquitectura CISC de 8 bits con menor eficiencia por ciclo frente a AVR/ARM implica menor rendimiento por MHz en tareas computacionales intensivas.
- Memoria limitada, 4 kB Flash, 128 B RAM y ausencia de periféricos analógicos integrados (ADC/DAC), lo que puede requerir más hardware externo.
- Menos ecosistema "plug & play" moderno comparado con Arduino (bibliotecas y shields) o STM32.

3.3.3 Diseño del circuito

El diseño del circuito del generador de campos electromagnéticos se estructura en cuatro etapas funcionales, las cuales permiten transformar parámetros de configuración definidos por el usuario en una corriente controlada aplicada a la bobina de generación del campo magnético. Esta arquitectura modular facilita la simulación del sistema y su eventual implementación física.

1. **Selección de parámetros del campo:** La primera etapa corresponde a la selección de los parámetros fundamentales del campo electromagnético, tales como la frecuencia de operación, la amplitud de la señal y el modo de excitación. Esta selección se realiza mediante un sistema de entrada digital que permite definir de forma discreta las condiciones experimentales, garantizando la repetibilidad de los ensayos. Los parámetros seleccionados determinan directamente las exigencias impuestas a las etapas posteriores del circuito.
2. **Uso del microcontrolador:** La segunda etapa está constituida por el microcontrolador AT89C51, encargado de procesar la información de configuración y generar la secuencia digital correspondiente a la señal deseada. En esta etapa se implementa el control temporal del sistema, incluyendo la generación de tablas de muestras senoidales, la temporización de la señal y la activación de señales de control para el conversor digital–analógico y la etapa de potencia. El microcontrolador actúa como el núcleo del sistema, coordinando el funcionamiento global del generador.
3. **Conversión digital–analógica mediante DAC0808:** La tercera etapa corresponde a la conversión digital–analógica, implementada mediante el conversor DAC0808, un DAC de 8 bits de tipo corriente, ampliamente utilizado en aplicaciones de generación de señales y control. El DAC0808 convierte la palabra digital proveniente del microcontrolador en una corriente proporcional, la cual es posteriormente transformada en una señal de tensión mediante una etapa de adaptación. Debido a la naturaleza discreta de la conversión, la señal resultante es sometida a un filtro de reconstrucción, cuyo objetivo es atenuar las componentes armónicas de alta frecuencia y mejorar la fidelidad de la forma de onda generada. La elección del DAC0808 se justifica por su simplicidad de

implementación, compatibilidad con sistemas de 8 bits y amplia disponibilidad de modelos para simulación, lo que lo hace adecuado para el alcance de esta memoria.

4. **Etapas de amplificación de corriente hacia la bobina:** La cuarta etapa consiste en la amplificación de la señal analógica para suministrar la corriente necesaria a la bobina de generación del campo magnético. Esta etapa adapta la señal proveniente del DAC a los niveles de corriente requeridos, considerando la carga inductiva de la bobina y la estabilidad del sistema. Asimismo, se incorporan elementos de protección eléctrica para limitar sobrecorrientes y mitigar transitorios, garantizando un funcionamiento seguro durante la operación continua del generador.

3.4 Software de Simulación

En el presente trabajo se utiliza el software Proteus 8.11, un entorno de simulación electrónica desarrollado por Labcenter Electronics, ampliamente empleado tanto en el ámbito académico como industrial para el diseño, análisis y verificación de circuitos electrónicos. Este software permite modelar de manera integrada el comportamiento de sistemas analógicos y digitales, incluyendo la simulación interactiva de microcontroladores en conjunto con el hardware periférico que estos controlan.

Una de las principales ventajas de Proteus es su capacidad para simular microcontroladores ejecutando código compilado, en formato hexadecimal o binario, lo que lo convierte en una herramienta especialmente adecuada para la validación de sistemas embebidos previo a su implementación física. El entorno soporta diversas familias de microcontroladores, entre las que se incluyen 8051, PIC, AVR y ARM, permitiendo una amplia flexibilidad en el desarrollo de aplicaciones.

En el contexto de este proyecto, Proteus posibilita la integración del microcontrolador AT89C51 con los distintos bloques del sistema, tales como la etapa de generación de señal, el conversor digital–analógico, la amplificación de corriente y la bobina de excitación. Esto permite realizar una validación funcional completa del generador de

campos magnéticos, facilitando ajustes rápidos en el diseño y una observación detallada del comportamiento de las señales sin necesidad de construir físicamente el circuito.

Además, su interfaz gráfica facilita el diseño esquemático y la visualización de resultados a través de instrumentos virtuales como osciloscopios, generadores de funciones y analizadores lógicos, lo que contribuye a un análisis completo del circuito simulado.

3.4.1 Gestión de archivos de simulación en Proteus

Durante el desarrollo de un proyecto de simulación en Proteus se generan diversos archivos, cada uno con una función específica dentro del flujo de diseño y validación. La Tabla 3.5 presenta una descripción de las principales extensiones de archivo asociadas a un proyecto típico, indicando su propósito, su carácter esencial y el software que los genera.

Los archivos .pdsprj y .adf constituyen la base del proyecto, ya que almacenan la configuración general y el esquema eléctrico del sistema, respectivamente. Por otro lado, archivos como .ams contienen información asociada a instrumentos virtuales y resultados de simulación, facilitando el análisis del comportamiento del circuito. Asimismo, el archivo .hex representa el código compilado que es cargado en el microcontrolador simulado, estableciendo el vínculo entre el software desarrollado y el hardware modelado. Los archivos identificados con el símbolo “~” corresponden a copias de seguridad automáticas y no son esenciales para la ejecución del proyecto.

Tabla 3.5 Descripción de los archivos generados en un proyecto de Proteus

Extensión	Descripción	¿Es esencial?	Generado por
.pdsprj	Archivo principal del proyecto Proteus. Contiene referencias y configuración general del proyecto.	Sí	Proteus
.pdsbak	Copia de seguridad automática del archivo .pdsprj.	No	Proteus
.adf	Archivo de diseño esquemático. Contiene el circuito principal.	Sí	Proteus
.adf~	Respaldo del archivo .adf.	No	Proteus
.ams	Contiene anotaciones, configuraciones de instrumentos y resultados de simulaciones.	til	Proteus
.ams~	Copia de seguridad del archivo .ams.	No	Proteus
.hex	Código compilado listo para ser ejecutado por el microcontrolador.	Sí	Compilador (MCU 8051 IDE, Keil, etc.)
.hex~	Respaldo del archivo .hex.	No	Compilador
.lst	Listado en ensamblador generado tras la compilación, útil para depuración.	Útil	Compilador
.lst~	Respaldo del archivo .lst.	No	Compilador
.bin	Archivo binario alternativo al .hex. No siempre necesario.	No	Compilador
.biñ	Respaldo del archivo .bin.	No	Compilador
.mcu8051ide	Proyecto fuente del entorno MCU 8051 IDE. Contiene el código editable y configuraciones.	Sí (si se va a modificar el código)	MCU 8051 IDE

3.4.2 Diferencia entre los archivos .hex y .mcu8051ide

Con el fin de clarificar el flujo de desarrollo del software embebido, la **Tabla 3.6** presenta una comparación entre los archivos .hex y .mcu8051ide, los cuales están directamente relacionados con la programación del microcontrolador, pero cumplen roles claramente diferenciados.

El archivo .mcu8051ide corresponde al proyecto fuente, donde se escribe y edita el código del programa, junto con las configuraciones del entorno de desarrollo. En cambio, el archivo .hex es el resultado del proceso de compilación, y contiene el código en lenguaje máquina que puede ser interpretado y ejecutado por el microcontrolador.

En el entorno Proteus, únicamente el archivo .hex es utilizado para simular el funcionamiento del microcontrolador, mientras que el archivo .mcu8051ide no se emplea de forma directa en la simulación.

Esta distinción resulta fundamental para comprender la cadena de desarrollo y simulación del sistema embebido implementado en esta memoria.

Tabla 3.6: Comparación entre los archivos .hex y .mcu8051ide

Característica	.mcu8051ide	.hex
Contenido	Código fuente del programa (en lenguaje C o ensamblador) junto con configuraciones del entorno de desarrollo.	Código compilado en lenguaje máquina (formato Intel HEX) que el microcontrolador puede ejecutar.
Propósito	Permite escribir, editar y guardar el proyecto en el entorno MCU 8051 IDE.	Es el archivo que se carga en Proteus para simular el funcionamiento del microcontrolador.
Edición	Editado por el usuario.	No editable (es lenguaje máquina).
Generado por	MCU 8051 IDE (o entorno similar) al guardar el proyecto.	Compilador al compilar el código fuente.
Uso en Proteus	No se utiliza directamente.	Es cargado en el microcontrolador simulado en Proteus.
Analogía	Guion de una obra, editable por el escritor.	Actor con el guion memorizado actuando en el escenario.

A continuación, se muestra el flujo habitual de trabajo en este entorno en donde se describe cómo se pasa del código fuente al archivo que se simula en Proteus:

1. El usuario escribe el código fuente en el entorno de desarrollo, como MCU 8051 IDE, utilizando lenguaje ensamblador o C.
2. El archivo fuente y su configuración se guardan con la extensión .mcu8051ide, lo que permite continuar la edición posteriormente.
3. Al compilar el código, el entorno genera un archivo con extensión .hex, que contiene el programa traducido a lenguaje máquina, listo para ser ejecutado por el microcontrolador.

4. En el software de simulación Proteus, se diseña el circuito que incluye el microcontrolador (por ejemplo, AT89C51) y los demás componentes, como amplificadores y bobinas.
5. El archivo .hex se carga en el microcontrolador dentro de Proteus, permitiendo simular el comportamiento real del sistema.
6. Finalmente, se ejecuta la simulación para observar el funcionamiento del sistema físico y validar el diseño.

3.4.3 Construcción del prototipo

Si bien el presente trabajo se desarrolla exclusivamente en un entorno de simulación, resulta pertinente establecer las consideraciones fundamentales que deberían tenerse en cuenta en una eventual construcción física del prototipo propuesto. Estas consideraciones permiten evaluar la factibilidad práctica del sistema y sirven como guía para futuras etapas de implementación experimental.

3.4.3.1 Medición y calibración

La construcción del prototipo requeriría el uso de instrumentación adecuada para la correcta medición y calibración del sistema. Entre los instrumentos necesarios se incluyen un gaussímetro para la medición del campo magnético generado, sondas de corriente y tensión para la caracterización eléctrica del circuito, y un osciloscopio para la verificación de la forma de onda, frecuencia y estabilidad temporal de la señal aplicada a la bobina. Estas mediciones permitirían validar parámetros críticos tales como la intensidad del campo, su uniformidad espacial y, en el caso de operar en rangos de radiofrecuencia o microondas, la presencia de efectos térmicos asociados al calentamiento del sistema.

3.4.3.2 Seguridad y consideraciones prácticas

Desde el punto de vista de la seguridad, la implementación física del prototipo debe considerar los límites de exposición humana a campos electromagnéticos establecidos por normativas internacionales, así como la incorporación de medidas de protección eléctrica que mitiguen riesgos asociados a sobre corrientes y fallas de aislamiento. Adicionalmente, es necesario contemplar mecanismos adecuados de disipación de

calor y ventilación, especialmente cuando se opera a mayores niveles de potencia o frecuencia. Finalmente, deben considerarse las limitaciones prácticas impuestas por la potencia disponible, la frecuencia de operación y las características térmicas de los componentes, con el fin de asegurar un funcionamiento seguro y confiable del sistema.

CAPÍTULO 4. UNIDAD GENERADORA DE CAMPO

4.1 Descripción general del sistema

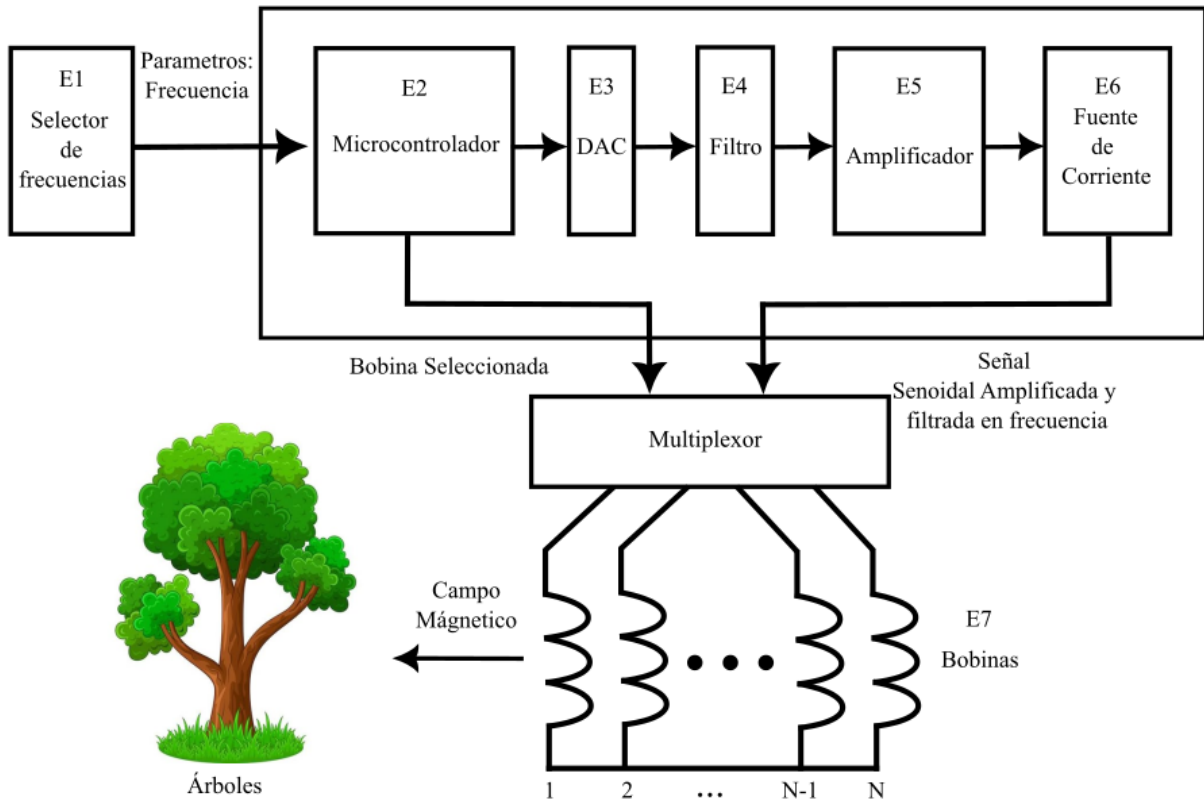


Figura 4.1: Diagrama de bloques del generador de campos magnéticos programable.

En consecuencia, a los objetivos establecidos en el **CAPÍTULO 1** se obtiene el esquema general del sistema el cual se observa en la **Figura 4.1** A continuación, se presenta el análisis y la síntesis de cada etapa, desde E1 hasta E7.

4.2 Etapa E1: Selector de frecuencias

La selección de las frecuencias de operación depende directamente del objetivo del campo electromagnético aplicado. Tal como se analizó en el **CAPÍTULO 3**, distintos rangos de frecuencia y amplitud pueden producir efectos diferenciados, que incluyen desde la estimulación del crecimiento y la germinación de plantas hasta la inhibición o control de insectos y patógenos. En el presente trabajo se opta por la generación de frecuencias extremadamente bajas (ELF), las cuales se han reportado en la literatura

como relevantes para estudios de interacción no térmica entre campos magnéticos y sistemas biológicos, particularmente en procesos fisiológicos asociados al desarrollo vegetal y a la respuesta al estrés.

4.3 Etapa E2: Microcontrolador

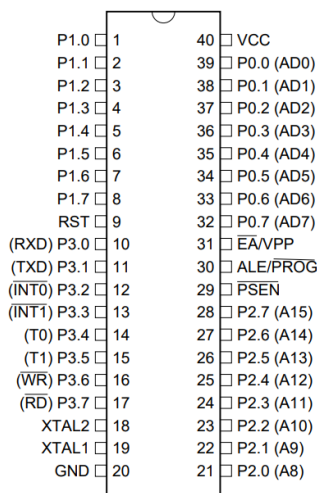


Figura 4.2: AT89C51 encapsulado en línea doble (Dual In-Line Package, DIP)[19].

El AT89C51, microcontrolador seleccionado, posee 40 pines cuyas funciones se ven detalladas en la **Tabla 4.1** En la presente implementación tenemos que:

- Oscilador (XTAL1-XTAL2): Se conecta un cristal de cuarzo X2, el cual establece la frecuencia de oscilación del sistema, en este caso 4Mhz. Además, desde cada terminal del cristal se conecta un capacitor (usualmente de 22 pF a 33 pF) hacia tierra, c1 Y c2, lo que permite estabilizar la oscilación y garantizar el correcto funcionamiento del reloj interno del microcontrolador.
- Reset (9): El pin RST del microcontrolador AT89C51 se encuentra conectado a un circuito RC conformado por la resistencia R1 de 8,2kΩ y el condensador C3 de 10uF, unidos en un mismo nodo. El otro extremo de la resistencia se conecta a tierra, mientras que el otro extremo del condensador se conecta al positivo de la batería B1 de 5V, la cual presenta adicionalmente la resistencia R2 de 10kΩ en paralelo para estabilizar la tensión. Esta configuración permite generar un pulso de reset inicial al encender el sistema, permitiendo ejecutar la ejecución

del micro en un estado conocido, cargando el condensador C3 y manteniendo temporalmente el pin RST en alto.

- $\overline{EA}(31)$: (External Access Enable) controla si el microcontrolador ejecuta el programa desde la memoria interna o externa. Al estar conectado al positivo de la batería B1, se encuentra en nivel alto, por lo que el AT89C51 utiliza su memoria ROM interna.
- $\overline{PSEN}(29)$ $ALE(30)$: Estos pines no se encuentran conectados porque no se está utilizando memoria externa ni funciones de programación en el diseño actual permaneciendo en un estado flotante. Esta condición es aceptable en configuraciones que solo usan la memoria interna.
- En el diseño del sistema, el puerto 1 del microcontrolador se utiliza como entrada, mientras que el puerto 0 se emplea como salida.

Tabla 4.1: Distribución de pines del microcontrolador AT89C51 (DIP40).

Pin	Nombre	Función
1–8	P1.0–P1.7	Puerto 1: E/S con pull-up internos
9	RST	Reset (activo en alto)
10	P3.0 (RXD)	Entrada serie (UART)
11	P3.1 (TXD)	Salida serie (UART)
12	P3.2 (INT0)	Interrupción externa 0
13	P3.3 (INT1)	Interrupción externa 1
14	P3.4 (T0)	Entrada Timer 0
15	P3.5 (T1)	Entrada Timer 1
16	P3.6 (WR)	Escritura en memoria externa
17	P3.7 (RD)	Lectura en memoria externa
18	XTAL2	Salida oscilador
19	XTAL1	Entrada oscilador
20	GND	Tierra
21–28	P2.0–P2.7	Puerto 2: E/S o líneas altas de dirección (A8–A15)
29	PSEN	Program Store Enable (lectura de programa externo)
30	ALE/PROG	Address Latch Enable / Programación
31	EA/VPP	External Access: 1=ROM interna, 0=ROM externa
32–39	P0.0–P0.7	Puerto 0: E/S (bus AD0–AD7, requiere pull-up externo)
40	VCC	Alimentación +5V

Una vez configurado el microcontrolador y establecida la entrada para la selección de frecuencias, nos enfocamos en su programación, cuya función principal es transformar la combinación de los interruptores de entrada en una señal senoidal digital.

En la **Figura 4.3** se muestra la rutina de retardo (DELAY) implementada en el microcontrolador la cual permite modificar la frecuencia de la señal senoidal de salida. En primer lugar, se utiliza la instrucción DJNZ R0, L1, correspondiente a *Decrement and Jump if Not Zero*, la cual decrementa el contenido del registro R0 y, a continuación, verifica si su valor es distinto de cero para repetir el bucle. Cuando los interruptores conectados al puerto P1 se encuentran en el estado 0x00, el registro R0 se inicializa en cero; al ejecutarse la instrucción DJNZ, el registro experimenta un *underflow* y pasa al valor 255, provocando que el bucle se ejecute 255 veces antes de finalizar. Esta condición genera el retardo máximo del sistema, lo que se traduce en una señal senoidal de muy baja frecuencia en el puerto P0, correspondiente al valor mínimo observable en la simulación.

Por otro lado, cuando el puerto P1 se encuentra en el estado 0xFF, el registro R0 se inicializa en 255 y se decrementa progresivamente hasta alcanzar el valor cero, produciendo nuevamente un retardo elevado. En este caso, el tiempo entre actualizaciones de la salida es tan prolongado que, en la escala de visualización utilizada, la señal presente en el puerto P0 aparece prácticamente como una componente continua, dado que las variaciones son demasiado lentas para ser perceptibles.

En la implementación de la rutina, el registro R0 determina la cantidad de iteraciones del bucle interno de retardo, mientras que el registro R1 define el tiempo de ejecución de dicho bucle. El registro R2 se utiliza como índice para seleccionar la posición del dato que se envía al conversor digital–analógico, incrementándose de manera secuencial. El acumulador A cumple una doble función: inicialmente carga el índice del dato a extraer y, posteriormente, almacena el valor correspondiente que se enviará al puerto P0. Cabe destacar que, debido a las restricciones del conjunto de instrucciones del microcontrolador, no es posible transferir directamente el contenido del puerto P1

al registro R0 mediante una instrucción MOV, razón por la cual se emplea el acumulador A como variable auxiliar para realizar esta operación.

```

1  ;-----
2  ; PROGRAMA DE PRUEBA: GENERAR W VARIABLE
3  ;-----
4
5      ORG      0          ; Direccin de arranque del programa
6 INICIO: JMP      PP      ; Salta a la rutina principal (PP)
7
8  ;-----
9      ORG      20H        ; A partir de aqu estar la rutina principal
10 PP:   ACALL    INICIAR    ; Llama a la rutina de inicializacin
11 LOOP: ACALL    LEER_SACAR ; Llama a la rutina que lee y saca datos al puerto
12      ACALL    DELAY      ; Llama a la rutina de retardo
13      JMP      LOOP      ; Repite indefinidamente
14 ;-----
15
16 ;--- Rutina INICIAR ---
17 INICIAR: MOV     R2,#0    ; Inicializa el registro R2 en cero
18          RET             ; Regresa
19
20 ;--- Rutina LEER_SACAR ---
21 LEER_SACAR: MOV   A,R2    ; Mueve a acumulador el valor de R2 (ndice)
22             MOV   DPTR,#DATOS ; Carga en DPTR la direccin base de la tabla DATOS
23             MOVC  A,@A+DPTR ; Usa R2 como offset y lee un dato de la tabla
24             MOV   P0,A    ; Saca el dato al puerto P0
25             INC   R2      ; Incrementa R2 para el prximo dato
26             RET          ; Regresa
27
28 ;--- Rutina DELAY ---
29 DELAY:  MOV   A,P1        ; Lee el valor de P1 (definir el tiempo de retardo)
30          MOV   R0,A       ; Lo pasa al registro R0 (contador del delay)
31 L1:     DJNZ  R0,L1       ; Decrementa R0 hasta 0 genera el retardo
32          RET             ; Regresa
33 ;-----
34
35 ; Tabla de datos (ejemplo)
36 DATOS:  DB      7FH,     82H,     85H,     88H,     8BH,     8EH,     91H,
37          94H,     97H,     9AH
38 ;-----
39      ORG      40H

```

Figura 4.3: Programa de prueba - Generar frecuencia variable

4.4 Etapa E3: Conversor Análogo Digital (DAC)

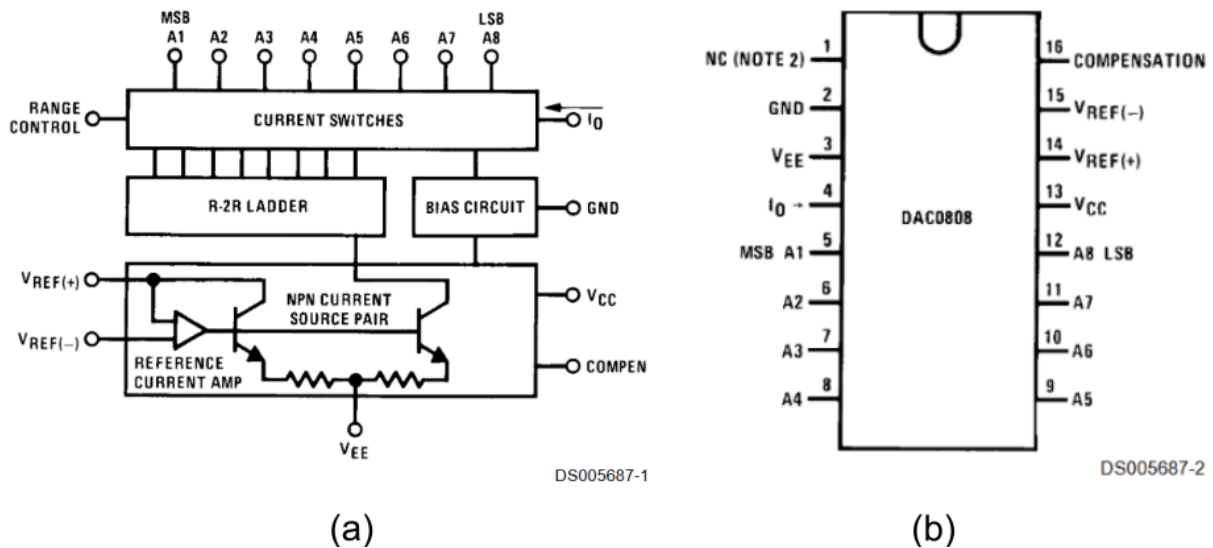


Figura 4.4: DAC0808 (a) Diagrama de bloques (b) encapsulado en línea doble [24].

El DAC0808 es un conversor análogo-digital de 8 bits que puede generar 256 niveles discretos de salida analógica, distribuidos entre cero y el valor máximo definido por la referencia y el circuito de conversión corriente-voltaje. Su principio de operación se basa en una red de resistencias ponderadas y conmutadores electrónicos, controlados por las entradas digitales siendo el D7 el bit más significativo y el D0 el bit menos significativo.

El DAC0808, el cual entrega una corriente proporcional al valor digital aplicado a sus entradas, por lo que requiere una etapa adicional de acondicionamiento para obtener una señal de voltaje utilizable en etapas posteriores del sistema. Esta característica lo hace especialmente adecuado para aplicaciones donde se desea un control preciso de la amplitud de la señal mediante componentes externos.

La escala completa del DAC0808 está determinada por la corriente de referencia, la cual se fija mediante una resistencia externa conectada al pin V_{ref+} . Habitualmente, el pin V_{ref-} se conecta a tierra, mientras que V_{ref+} se alimenta desde una fuente de referencia estable a través de la resistencia R_{ref} , en el presente caso, tiene un valor de $1k\Omega$, para que, con un voltaje en las unidades de los volts, se tenga una corriente en las unidades de los miliamper. De esta forma, la corriente de referencia queda

definida por la relación entre la tensión de referencia y el valor de R_{ref} , lo que permite ajustar el rango de corriente máxima de salida del conversor. Esta corriente de referencia no se encuentra en la salida del DAC, sino que actúa internamente como parámetro de escalamiento.

$$i_{ref} = \frac{(V_{ref+} - V_{ref-})}{R_{Ref}} = \frac{(5 - 0)}{1k\Omega} = 5mA \quad \text{Ec (4.1)}$$

La salida I_{out} del DAC0808 entrega una corriente que varía linealmente con el código digital aplicado, desde un valor cercano a cero cuando todos los bits se encuentran en nivel bajo, hasta un valor máximo aproximado igual a $255/256$ de la corriente de referencia cuando todos los bits están en nivel alto. Dado que esta salida no es una señal de voltaje, la corriente generada debe convertirse mediante una etapa externa de conversión corriente–tensión.

Para realizar dicha conversión, la salida I_{out} se conecta a un amplificador operacional configurado como inversor de transimpedancia. En esta configuración, la entrada no inversora del amplificador se conecta a tierra, mientras que la entrada inversora recibe la corriente proveniente del DAC. La resistencia de realimentación del amplificador operacional determina la ganancia de conversión, estableciendo una relación directa entre la corriente de salida del DAC y el voltaje de salida del sistema. Como resultado, el voltaje de salida es proporcional al código digital aplicado, presentando una inversión de fase que no afecta el funcionamiento del sistema, ya que puede ser compensada en el dominio digital o en etapas posteriores. A la salida del Amplificador operacional U2 se tiene:

$$V_{out}(U2) = -I_{out} 1k\Omega \quad , con 0 < I_{out} < I_{ref} = 5mA \quad \text{Ec (4.2)}$$

Adicionalmente, el DAC0808 dispone de un pin de compensación, denominado COMP, el cual permite mejorar la estabilidad del sistema mediante la conexión de un capacitor externo. Este elemento ayuda a reducir oscilaciones y ruido de alta frecuencia, especialmente cuando el DAC opera junto a amplificadores operacionales y filtros

analógicos. Por otra parte, el pin VEE corresponde a la alimentación negativa del dispositivo y, en aplicaciones de baja frecuencia y propósito académico, puede conectarse a tierra sin afectar significativamente el desempeño del convertor, sin embargo, tener una fuente negativa permite que se maneje correctamente corrientes cercanas a cero y mejore la no linealidad.

En conjunto, la utilización del DAC0808 con una etapa de amplificación adecuada permite obtener una señal analógica de alta fidelidad a partir de datos digitales generados por el microcontrolador, constituyendo un bloque fundamental dentro del sistema de generación de campos magnéticos propuesto en esta memoria.

4.5 Etapa E4: Filtro

El filtro pasabanda se emplea para suavizar la señal de salida del convertor digital–analógico, atenuando las componentes de alta frecuencia generadas durante el proceso de conversión y preservando principalmente la componente fundamental de la señal. De esta manera, se obtiene una forma de onda más limpia y estable, adecuada para la excitación de las bobinas, reduciendo interferencias y efectos no deseados en la etapa de potencia.

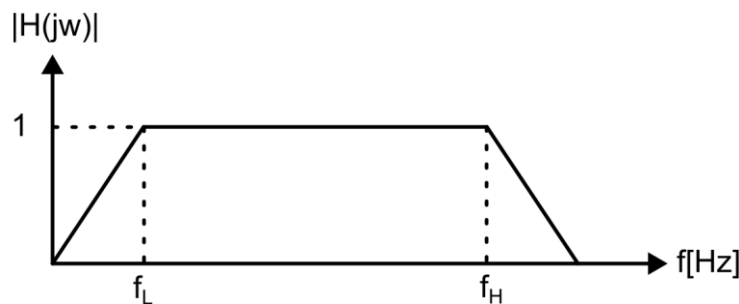


Figura 4.5: Respuesta en frecuencia de filtro pasabanda.

Dado que el sistema está diseñado para operar dentro de un conjunto específico de frecuencias, la respuesta en frecuencia global debe permitir el paso de señales en el rango de extremadamente baja frecuencia (ELF), al mismo tiempo que atenúa los armónicos de mayor frecuencia. En este diseño, el rango de operación se extiende aproximadamente desde $f_L = 1$ Hz hasta $f_H = 150$ Hz, como se observa en la **Figura 4.5**, por lo que resulta necesario analizar la respuesta en frecuencia del sistema

completo. En primer lugar, debe considerarse que los amplificadores operacionales introducen de manera inherente una limitación en frecuencia debido a su ancho de banda finito, el cual depende de la tecnología y características del dispositivo empleado. En términos generales, los amplificadores operacionales de propósito general presentan anchos de banda del orden de 1 MHz o superiores, por lo que estas limitaciones no resultan restrictivas para aplicaciones en el rango ELF.

En el presente diseño se utiliza el amplificador operacional LF351, el cual presenta un producto ganancia–ancho de banda (GBW) típico del orden de 4 MHz. Esta característica le permite operar con un amplio margen en aplicaciones de baja frecuencia, asegurando que la frecuencia de operación del sistema se encuentre muy por debajo del límite impuesto por el amplificador. En consecuencia, se garantiza una adecuada fidelidad de la señal y un comportamiento estable dentro del rango de frecuencias de interés.

Como se observa en la **Figura 4.6**, el capacitor C5 conectado entre la salida del amplificador operacional y tierra forma, junto con la resistencia de salida equivalente del circuito, un filtro pasa-bajos. En la práctica, la resistencia de salida del amplificador es relativamente pequeña, del orden de decenas de ohmios; sin embargo, para efectos de análisis, el comportamiento dominante del filtro puede aproximarse utilizando una resistencia equivalente del orden de 1 kΩ, asociada a la impedancia vista por el capacitor. Este filtro tiene como función principal atenuar las componentes de alta frecuencia presentes en la señal. Considerando los valores C5 = 1 μF y Req = 1 kΩ, la frecuencia de corte del filtro pasa-bajos queda determinada por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_{eq} C5} = \frac{1}{2\pi \cdot 1k\Omega \cdot 1\mu F} = 159Hz \quad \text{Ec (4.3)}$$

Por otra parte, el capacitor C6 cumple la función de acoplamiento entre la salida de la etapa transimpedancia y la entrada del amplificador operacional sumador. Su objetivo principal es eliminar la componente continua de la señal, permitiendo únicamente el paso de la componente alterna. Este capacitor, en conjunto con la resistencia de

entrada del amplificador sumador, forma un filtro pasa-altos de primer orden. Considerando una resistencia de entrada $R_{in} = 10\text{ k}\Omega$ y un capacitor $C6 = 10\text{ }\mu\text{F}$, la frecuencia de corte del filtro pasa-altos se calcula como:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_{in} C6} = \frac{1}{2\pi 10\text{ k}\Omega 100\text{ }\mu\text{F}} = 0.159\text{ Hz} \quad \text{Ec (4.4)}$$

Este valor permite el paso sin atenuación significativa de todas las frecuencias seleccionadas para el sistema, con excepción de la componente continua correspondiente a 0 Hz. Posteriormente, se obtiene la respuesta en frecuencia del filtro propuesto, mostrada en la **Figura 4.6**, donde mediante el uso del cursor se verifica que a una frecuencia de 159 Hz se produce una atenuación de 3 dB, correspondiente a la frecuencia de corte superior calculada. En cuanto a la frecuencia de corte inferior, fijada en 0,159 Hz, se puede asegurar un adecuado desempeño del filtro, ya que la presencia del capacitor en serie atenúa la componente continua y las frecuencias muy bajas, permitiendo el correcto paso de las señales de interés dentro del rango de operación del sistema.

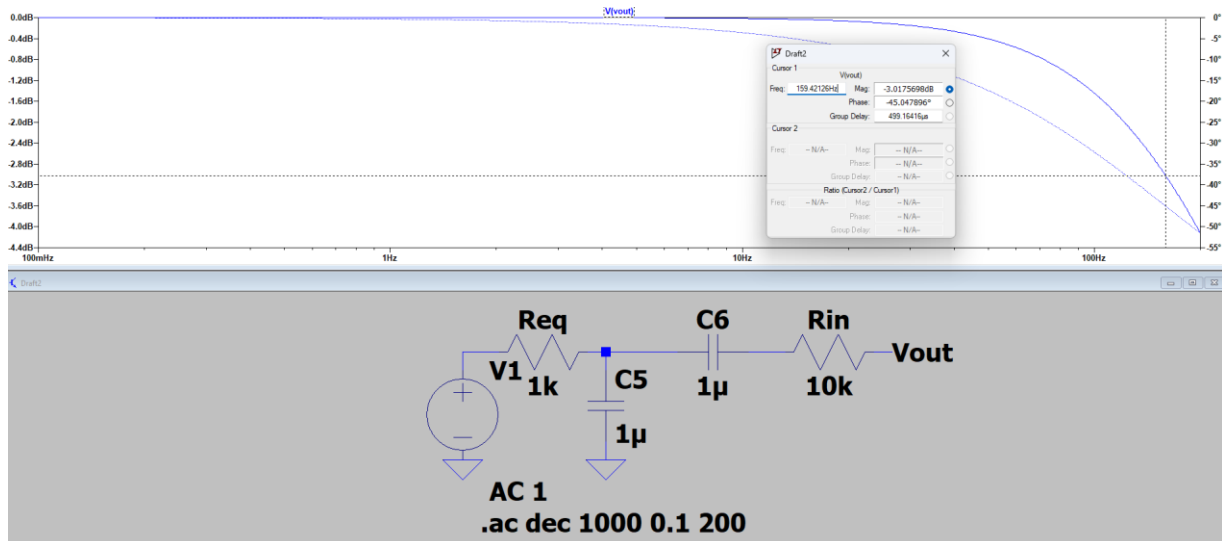


Figura 4.6: Simulación en LTspice de la etapa E2 Filtro.

4.6 Etapa E5: Amplificador

El amplificador tiene como objetivo el acondicionamiento de la señal. Recibe una señal sinusoidal de entrada, elimina su componente continua y permite únicamente el paso de la componente alterna. Posteriormente, se incorpora un nivel de offset ajustable y se aplica una ganancia previamente definida, con el propósito de obtener una señal de salida adecuada para su procesamiento en las etapas posteriores del sistema.

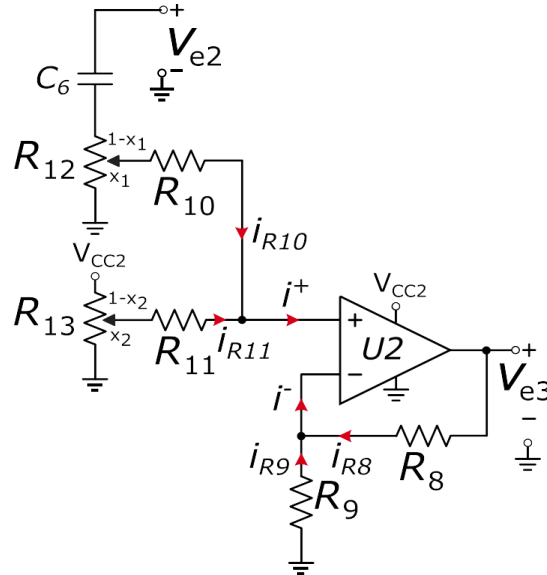


Figura 4.7: Amplificador de voltaje.

Se recibe la señal sinusoidal V_{e2} en el capacitor $C6$, este cumple la función de quitar toda la parte continua de la señal entrante V_{e2}^{DC} y solo permite el paso de la parte alterna V_{e2}^{AC} .

El potenciómetro R_{12} y la resistencia R_{10} forman un divisor resistivo, al igual que R_{13} y R_{11} , lo que determina el voltaje $V^+(U2)$, que queda en función de los elementos mencionados anteriormente y la posición x_1 y x_2 de los potenciómetros R_{12} y R_{13} respectivamente, con x_1 y $x_2 \in [0,1]$. Haciendo LCK en $V^+(U2)$:

$$i_{R_{10}} + i_{R_{11}} = i^+(U2) \quad \text{Ec (4.5)}$$

$$\frac{V_{e2}^{AC} x_1 - V^+(U2)}{R_{10}} + \frac{V_{CC2} x_2 - V^+(U2)}{R_{11}} = 0 \quad \text{Ec (4.6)}$$

$$V^+(U2) = \frac{V_{e2}^{AC} x_1 R_{11} + V_{CC2} x_2 R_{10}}{R_{10} + R_{11}} \quad \text{Ec (4.7)}$$

Luego haciendo LCK en V^- :

$$i_{R_8} + i_{R_9} = i^-(U2) \quad \text{Ec (4.8)}$$

$$\frac{V_{e3} - V^-(U2)}{R_8} + \frac{0 - V^-(U2)}{R_9} = 0 \quad \text{Ec (4.9)}$$

$$V^-(U2) = \frac{V_{e3} R_9}{R_8 + R_9} \quad \text{Ec (4.10)}$$

Asumiendo un cortocircuito virtual en donde los voltajes de los pines de entrada del amplificador operacional tienden a ser iguales:

$$V^-(U2) = V^+(U2) \quad \text{Ec (4.11)}$$

$$\frac{V_{e3} R_9}{R_8 + R_9} = \frac{(V_{e2}^{AC} x_1 R_{11} + V_{CC2} x_2 R_{10})}{R_{10} + R_{11}} \quad \text{Ec (4.12)}$$

$$V_{e3} = \frac{(V_{e2}^{AC} x_1 R_{11} + V_{CC2} x_2 R_{10})(R_8 + R_9)}{(R_{10} + R_{11}) R_9} \quad \text{Ec (4.13)}$$

El voltaje de salida resulta de la combinación de las componentes alterna y continua de la señal, y depende de la posición de los potenciómetros y de los valores de las resistencias del circuito.

4.7 Etapa E6: Fuente de Corriente

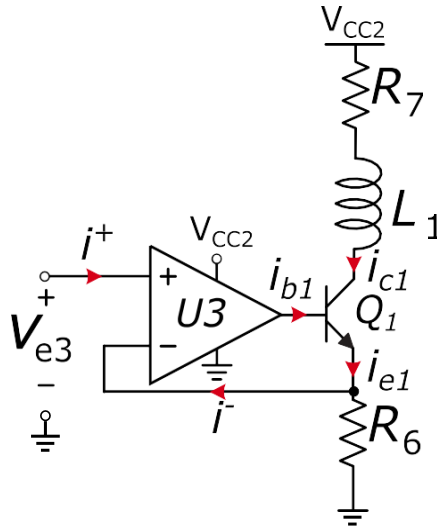


Figura 4.8: Fuente de corriente controlada utilizando amplificador operacional.

El amplificador operacional $U3$ conforma una fuente de corriente controlada y presenta las siguientes relaciones entre sus variables eléctricas de interés:

- Como el amplificador a su entrada presenta una alta impedancia se tiene que las corrientes $i^+ = i^-$ son no significativas, tienden a 0 en comparación con las demás corrientes presentes en el circuito, alcanzando un valor no más allá de las decenas de microamperios.
- Por cortocircuito virtual se tiene que $V_{e3} = V^+(U3) = V^-(U3) = V_{R6}$.
- $I_{e1} = \frac{V_{e3}}{R_6}$, en consecuencia, la corriente que circula por las resistencias R_6 y R_7 , la inductancia L_1 y el transistor Q_1 , asumiendo que el transistor está en zona lineal y se cumple que $i_{c1} \approx i_{e1}$, es lineal al voltaje de entrada V_{e3} con proporción $\frac{1}{R_6}$
- Analizando los estados del transistor definiremos los límites de la magnitud que puede circular por la bobina y a través de ellos también conocer los límites del campo magnético. Los límites de corriente en el transistor están dados por su condición de corte y saturación, la mínima corriente que puede circular es cuando el transistor pasa de corte a saturación, eso ocurre cuando $V_{e3} = 0,7V$

$$i_{c1min} = \frac{0,7V}{R_6}$$

En su contraparte la corriente máxima está definida por el paso entre las zonas activas y de saturación:

$$Vce_{sat} + i_{c1}(R_6 + R_7) + L_1 \frac{di_{c1}}{dt} = V_{CC2} \quad \text{Ec (4.14)}$$

$$Vce_{sat} + i_{c1}(R_6 + R_7) + sL_1 i_{c1} = V_{CC2} \quad \text{Ec (4.15)}$$

$$i_{c1} = \frac{V_{CC2} - Vce_{sat}}{sL_1 + (R_6 + R_7)} \quad \text{Ec (4.16)}$$

4.8 Etapa E7: Bobina generadora de campo magnético

4.8.1. Fundamentos teóricos de las bobinas

Una bobina, o inductor, es un componente eléctrico pasivo constituido por un conductor enrollado en forma de espiras. Cuando una corriente eléctrica circula a través de la bobina, se genera un campo magnético asociado al movimiento de cargas eléctricas. Este campo magnético se concentra principalmente en el interior del arrollamiento y es responsable del fenómeno de la inductancia.

La inductancia se define como la capacidad de una bobina para oponerse a variaciones de corriente, debido a la energía almacenada en su campo magnético. Matemáticamente, se expresa como la relación entre el flujo magnético concatenado y la corriente que lo produce.

4.8.2. Inductancia de una bobina

4.8.2.1 Expresión general

Para una bobina ideal, la inductancia puede aproximarse mediante la expresión clásica:

$$L = \mu \frac{N^2 A}{l} \quad \text{Ec (4.17)}$$

Donde:

- L es la inductancia [H],
- $\mu = \mu_0 \mu_r$ es la permeabilidad magnética del medio,
- N es el número de espiras,
- A es el área transversal de la bobina,
- l es la longitud del arrollamiento.

Esta relación muestra que la inductancia es directamente proporcional al cuadrado del número de espiras y a la permeabilidad del núcleo, e inversamente proporcional a la longitud de la bobina.

En el caso de bobinas con núcleo de aire, la permeabilidad relativa es aproximadamente $\mu_r = 1$, por lo que la permeabilidad del medio coincide con la del vacío (μ_0).

4.8.2.2 Fórmulas empíricas para bobinas reales

En aplicaciones prácticas, las bobinas presentan efectos parásitos que hacen que la expresión ideal pierda precisión. Por esta razón, se emplean fórmulas empíricas, siendo una de las más utilizadas la fórmula de Wheeler para bobinas cilíndricas de una sola capa:

$$L = \frac{a^2 N^2}{9a + 10l} \quad \text{Ec (4.18)}$$

Donde:

- L está en microhenrios (μH),
- a es el radio de la bobina [cm],
- l es la longitud del arrollamiento [cm].

Esta expresión permite obtener una estimación razonable del valor de inductancia durante la etapa de diseño preliminar.

4.8.2.3 Influencia del diámetro del alambre

El diámetro del conductor no afecta directamente el valor de la inductancia. Sin embargo, sí influye en parámetros eléctricos relevantes como la resistencia del arrollamiento y las pérdidas por efecto Joule. Un conductor de mayor diámetro presenta menor resistencia, permitiendo mayores corrientes con menores pérdidas térmicas, lo que mejora la eficiencia global de la bobina.

4.8.3. Campo magnético generado por una bobina

4.8.3.1 Principio físico

El campo magnético generado por una bobina es consecuencia directa de la corriente que circula por sus espiras. Cada espira contribuye al campo total, y la superposición de estos campos produce una región de alta densidad de flujo magnético en el interior de la bobina.

4.8.3.2 Campo magnético en un solenoide

Cuando las espiras están estrechamente distribuidas y ordenadas, la bobina se denomina solenoide. Para un solenoide largo, el campo magnético en su interior puede aproximarse por:

$$B = \mu_0 \mu_r n I \quad \text{Ec (4.19)}$$

donde:

- B es la densidad de flujo magnético [T],
- $n = \frac{N}{L}$ es la densidad de espiras [vueltas/m],
- I es la corriente [A].

Esta expresión se obtiene a partir de la Ley de Ampere y es válida cuando la longitud del solenoide es mucho mayor que su diámetro, condición que asegura un campo prácticamente uniforme.

4.8.3.3 Campo magnético de una bobina circular

En el centro de una bobina circular de radio R , el campo magnético se puede calcular mediante:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2R} \quad \text{Ec (4.20)}$$

Esta relación es útil para analizar bobinas compactas o lazos de corriente individuales.

4.8.4. Factores que influyen en el diseño de la bobina

El desempeño electromagnético de una bobina depende de múltiples parámetros:

- **Número de espiras (N):** incrementa linealmente el campo magnético y cuadráticamente la inductancia.
- **Corriente eléctrica (I):** el campo magnético es directamente proporcional a la corriente.
- **Material del núcleo:** el uso de materiales ferromagnéticos puede multiplicar la inductancia debido a su alta permeabilidad relativa.
- **Dimensiones geométricas:** la longitud y el diámetro influyen tanto en la intensidad como en la uniformidad del campo.
- **Frecuencia de operación:** a frecuencias elevadas aparecen fenómenos como el efecto piel, que afectan la distribución de corriente.

4.8.5. Campo magnético esperado para corrientes de baja intensidad

Considerando una bobina de núcleo de aire con geometría tipo solenoide, el campo magnético generado puede estimarse mediante la expresión $B = \mu_0 \frac{N}{L} I$, donde μ_0 es la permeabilidad del vacío, N el número de espiras, L la longitud de la bobina e I la corriente que circula por ella. Para un diseño representativo de laboratorio, con una bobina de $N = 200$ vueltas, una longitud de $L = 0,10$ m y una corriente de excitación limitada a $I = 10$ mA, se obtiene una densidad de flujo magnético aproximada de $B \approx 2,5 \times 10^{-5}$ T, equivalente a 25 μ T. Bajo estas condiciones, una variación máxima de tensión de 120 mVpp produce una variación de corriente de aproximadamente 7 mA, valor obtenido mediante cálculo teórico del circuito de

excitación. Este nivel de campo es comparable al orden de magnitud del campo magnético terrestre y se sitúa dentro del rango típicamente empleado en estudios experimentales con campos ELF. El resultado confirma que, aun con corrientes reducidas, es posible generar campos magnéticos medibles y reproducibles mediante un adecuado diseño geométrico de la bobina, sin necesidad de corrientes elevadas ni núcleos ferromagnéticos.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Este capítulo presenta los resultados obtenidos a partir de simulaciones realizadas en el entorno Proteus 8.11. En él se analizan las señales generadas por el sistema, la respuesta de la etapa de potencia, la intensidad del campo magnético inducido y la estabilidad global del generador bajo distintas condiciones de operación.

En primer lugar, la **Figura 5.1** muestra la simulación del sistema completo del generador de campos programable, el cual se encuentra estructurado en siete módulos funcionales claramente diferenciados, correspondientes a las etapas de selección de parámetros, control digital, conversión digital-analógica, filtrado, amplificación, excitación de la bobina e instrumentación de medición.

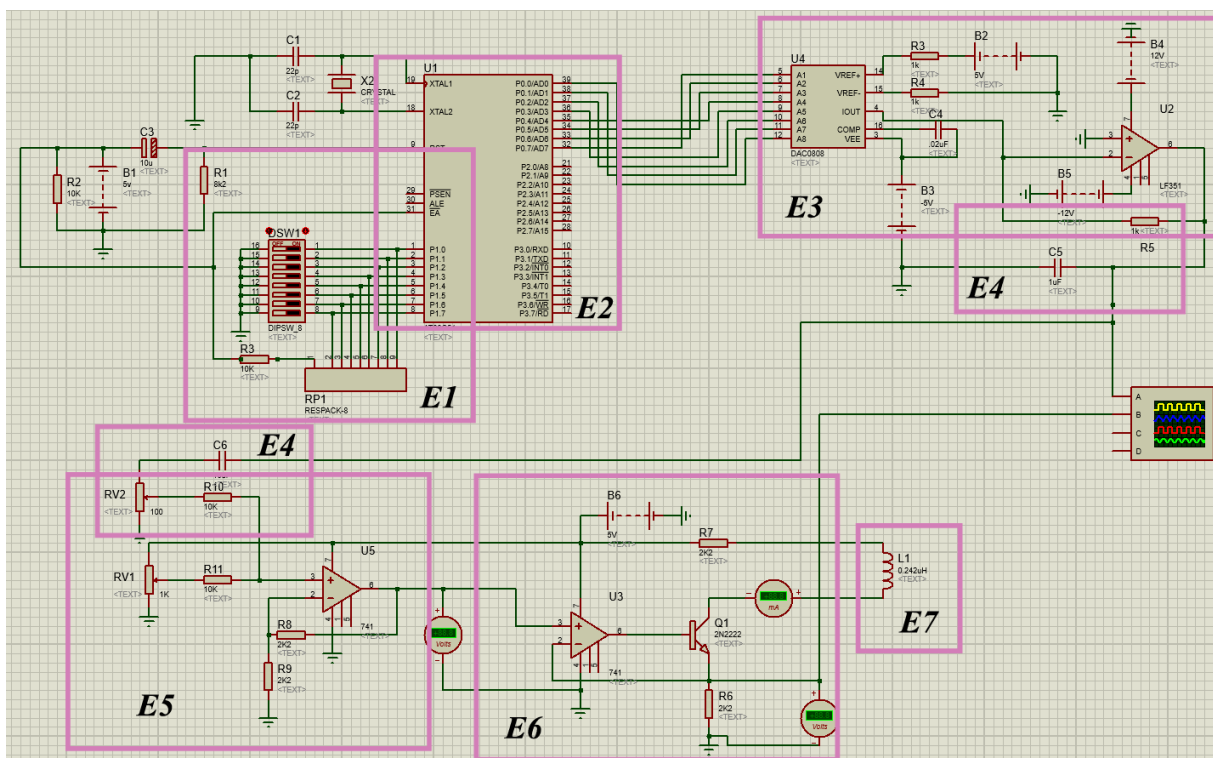


Figura 5.1: Simulación generador de campos magnéticos programable.

5.1 Etapa E1: Selector de Frecuencias

En el dispositivo propuesto, la selección de la frecuencia se realiza mediante el Puerto 1 del microcontrolador, el cual actúa como interfaz entre el usuario y el sistema generador de señal.

Todos los pines del puerto 1 (P1.0–P1.7) se configuran como entradas digitales provenientes del módulo de selección E1, permitiendo definir la frecuencia de la señal senoidal que se aplicará a la bobina. La frecuencia seleccionada depende de la combinación lógica establecida por la posición de los ocho interruptores como se observa en la **Figura 5.2**, los cuales cuentan con resistencias de pull-up implementadas mediante el paquete de resistencias digitales RP1. Dichas resistencias se encuentran alimentadas por la fuente de voltaje B1 a través de la resistencia R3 de 10 kΩ, asegurando niveles lógicos estables y evitando estados flotantes en las entradas del microcontrolador.

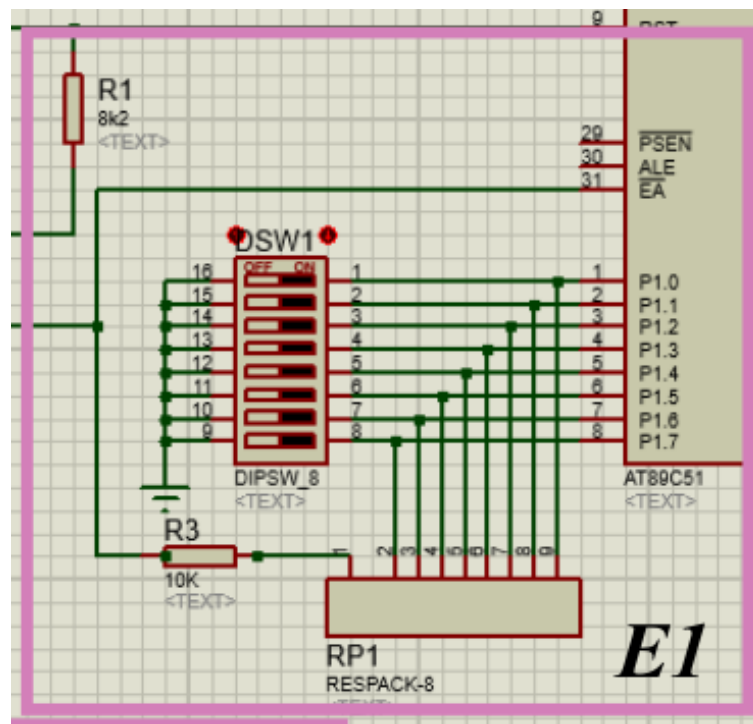


Figura 5.2 Implementación de E1 Selector de Frecuencias.

5.2 Etapa E2: Microcontrolador

El software Proteus 8 permite colocar de manera fácil microcontroladores para poder utilizarlos, como se observa en la **Figura 5.3**.

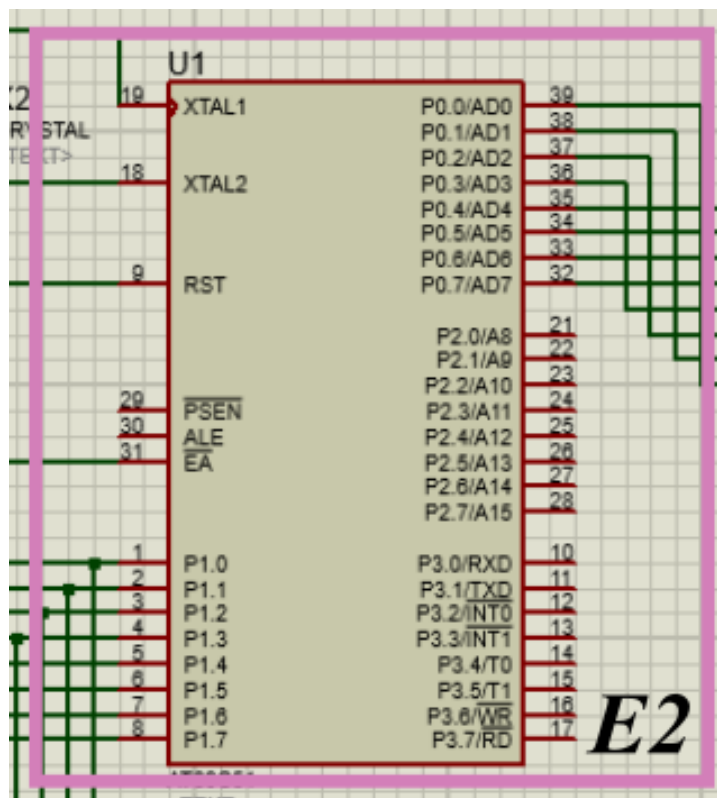


Figura 5.3: Implementación de E2 Microcontrolador

Al cargar el código mostrado en la Figura 4.3 y evaluar todas las combinaciones posibles de los interruptores del selector de frecuencias, se obtiene la **Tabla 5.1**, la cual presenta el rango de frecuencias generadas por el sistema. Los resultados muestran que el generador es capaz de operar en un intervalo comprendido entre 5 Hz y 123 Hz, cubriendo adecuadamente el rango de frecuencias extremadamente bajas (ELF) requerido para la aplicación propuesta.

Tabla 5.1: Combinaciones de switches y su valor correspondiente para la rutina DELAY

Switches	Hexadecimal	Decimal	cursor 1 [ms]	cursor 2 [ms]	Δ tiempo [ms]	Frecuencia [Hz]
00000000	0x00	0	355.85	560.07	204.02	4.878
00000001	0x01	1	2.04	10.13	8.09	123.6
00000010	0x02	2	2.27	11.11	8.84	113.122
00000100	0x04	4	2.66	13.02	10.36	96.53
00001000	0x08	8	-3.41	10.02	13.43	74.46
00001010	0x0A	10	3.82	18.81	14.99	66.7
00010000	0x10	16	5.06	24.65	19.59	51.05
00010100	0x14	20	5.84	28.47	22.62	44.19
00100000	0x20	32	8.14	40.04	31.9	31.35
00110010	0x32	50	-11.63	34.10	45.73	21.87
01000000	0x40	64	14.47	70.91	56.44	17.72
01100100	0x64	100	-21.44	62.52	83.96	11.91
10000000	0x80	128	-26.87	78.79	105.66	9.46
10010110	0x96	150	34.62	169.47	134.85	7.42
11001000	0xC8	200	119.35	280.55	161.2	6.2
11111110	0xFE	254	52.18	254.2	202.02	4.95
11111111	0xFF	255	0	0	0	0

5.3 Etapa E3: Conversor Digital Análogo

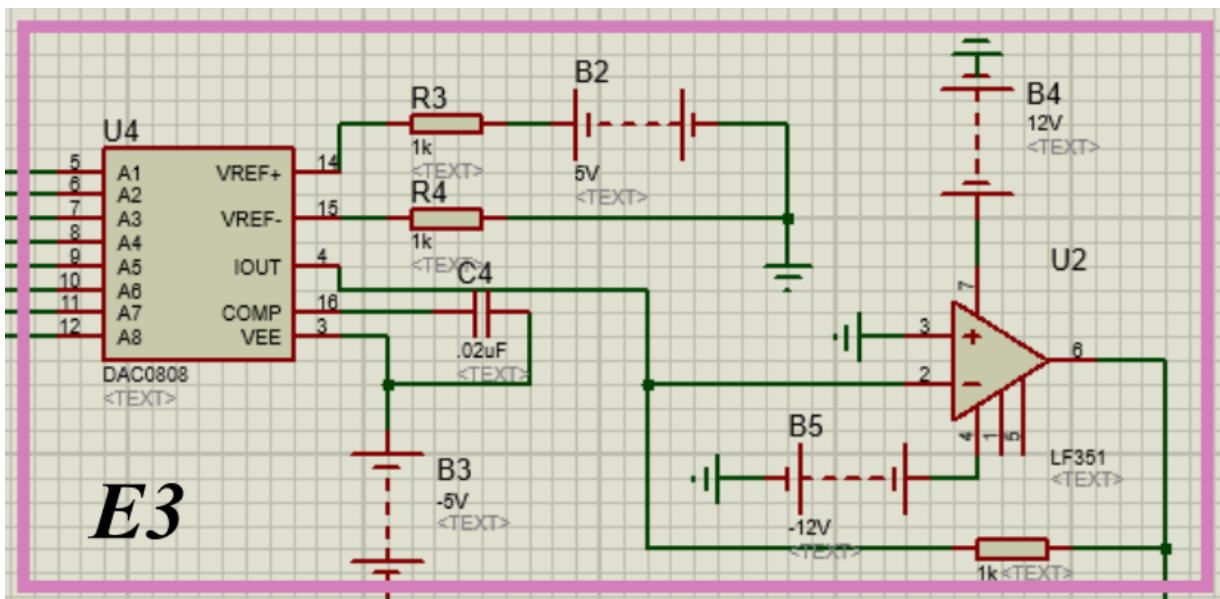


Figura 5.4: Conexión Microcontrolador/DAC/Corriente-Voltaje

El módulo de conversión digital–analógica se compone de dos etapas principales. La primera corresponde al conversor DAC0808, encargado de transformar la señal digital proveniente del microcontrolador en una señal analógica en forma de corriente. La segunda etapa consiste en un amplificador de transimpedancia, cuya función es convertir dicha corriente de salida en una señal de voltaje utilizable por las etapas posteriores del sistema.

Con el fin de verificar el correcto funcionamiento de este módulo, se realizarán mediciones tanto en el dominio digital como analógico. En particular, se evaluarán las condiciones de operación para la frecuencia mínima y la frecuencia máxima generadas por el sistema, midiendo la señal digital de entrada al DAC, la corriente de salida del conversor y el voltaje resultante a la salida del amplificador de transimpedancia.

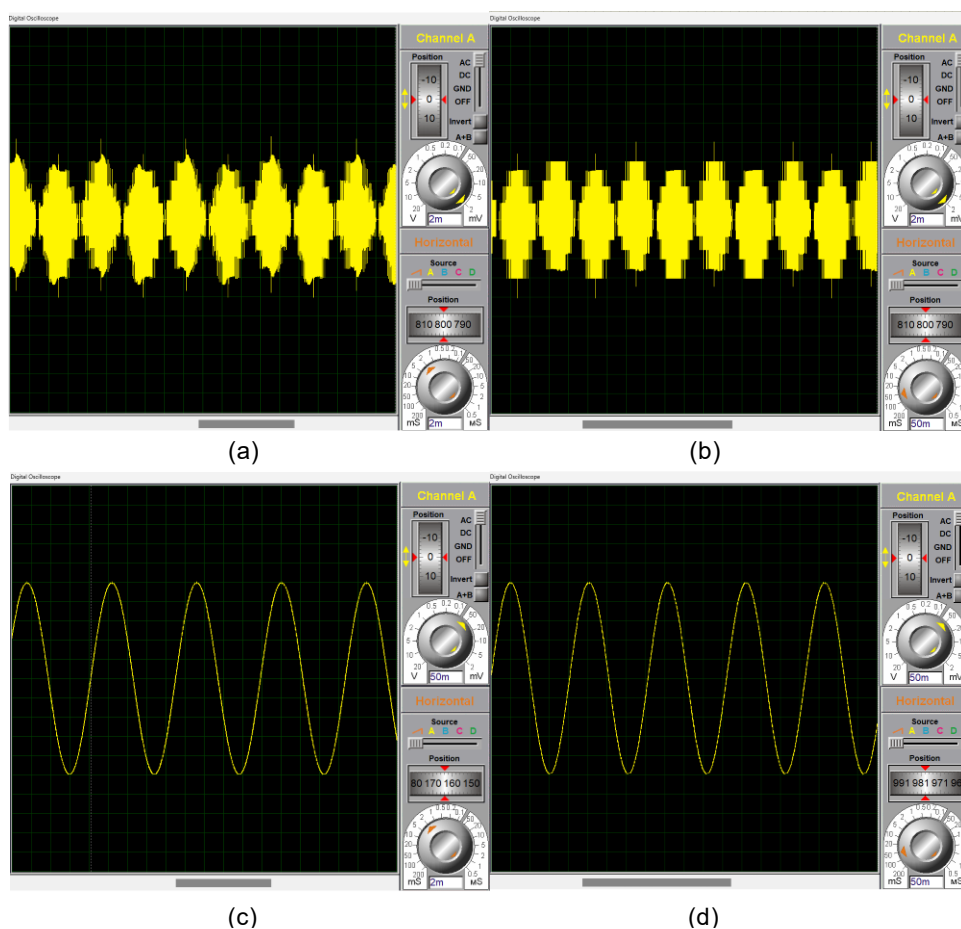


Figura 5.5: Corriente de salida del DAC a (a) 4.9Hz y (b) 123Hz, y Voltaje de Salida del Amplificador de Transimpedancia a (c) 4.9Hz y (d) 123Hz.

Como se observa en la **Figura 5.5** (a) y (b), se presenta la corriente de salida del conversor DAC para las frecuencias mínima y máxima generadas por el sistema, determinadas por la programación del microcontrolador. Dicha corriente exhibe un cierto nivel de rizado y ruido, asociado a la discretización inherente al proceso de conversión digital–analógica. En este caso, la corriente de salida del DAC varía aproximadamente entre 0 mA y 5–6 mA.

Posteriormente, al ser procesada por la etapa de amplificación de transimpedancia, la señal es convertida a voltaje y filtrada, obteniéndose una forma de onda sinusoidal de las mismas frecuencias mencionadas anteriormente, libre de ruido apreciable. La señal resultante presenta una amplitud aproximada de 500 mVpp, cumpliendo así con los requisitos establecidos para esta etapa del sistema.

5.4 Etapa E4: Filtro

Con el objetivo de verificar el correcto funcionamiento del filtro, se medirán las señales de voltaje a la salida de este, a fin de comprobar que su respuesta en frecuencia sea coherente con la prevista en el diseño. En particular, se analizará el comportamiento del filtro para distintas frecuencias de excitación dentro del rango de operación del sistema. Como se observa en la **Figura 5.6**, ambos filtros están conformados por una resistencia y una capacitancia, configurando las etapas de filtrado encargadas de modelar la respuesta en frecuencia deseada.

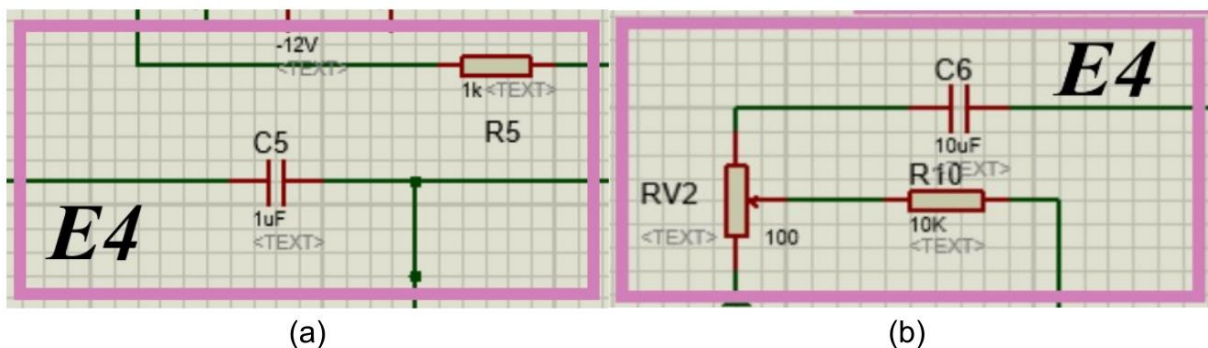


Figura 5.6: Filtro Pasabanda conformado por una parte (a) Pasa-altos y (b) Pasa-bajos.

En primer lugar, se implementa la señal correspondiente a la frecuencia mínima del sistema, obteniéndose la **Figura 5.7**, en la cual se observa una señal de aproximadamente 4 Hz con una amplitud de 40 mVpp. Posteriormente, al configurar el sistema para operar a la frecuencia máxima de 113 Hz, se obtiene una señal sinusoidal sin distorsión apreciable, con una amplitud cercana a 120 mVpp.

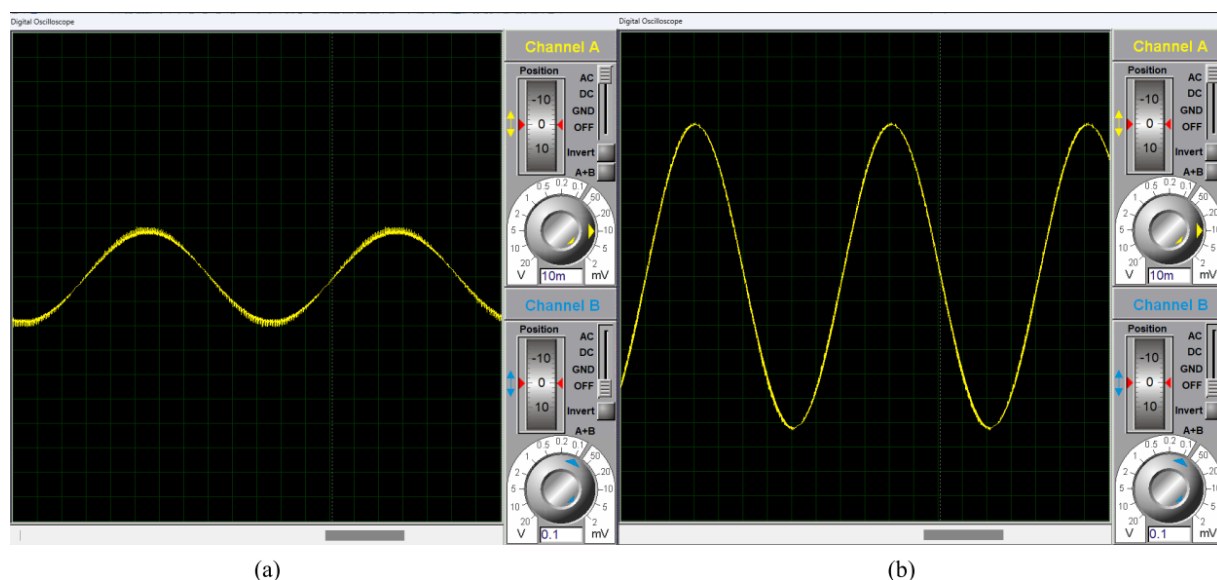


Figura 5.7: Voltaje de Salida del Filtro (a) 4.9Hz y (b) 123Hz.

Estos resultados confirman el correcto funcionamiento de la etapa de filtrado, la cual permite atenuar las componentes armónicas no deseadas y conservar principalmente la componente fundamental de la señal generada. De este modo, el filtro entrega una señal senoidal suavizada dentro del rango de frecuencias de operación del sistema, asegurando una adecuada calidad de forma de onda para su posterior amplificación y aplicación en la etapa de potencia.

5.5 Etapa E5: Amplificador

Esta etapa corresponde a un amplificador no inversor, tal como se muestra en la **Figura 5.8**, el cual incorpora dos potenciómetros que permiten el ajuste de sus parámetros de operación, además de la ganancia propia de la topología. En particular, tanto la amplitud de la señal senoidal proveniente del filtro pasabanda como el valor

del nivel de continua pueden ajustarse mediante los potenciómetros RV1 y RV2, respectivamente.

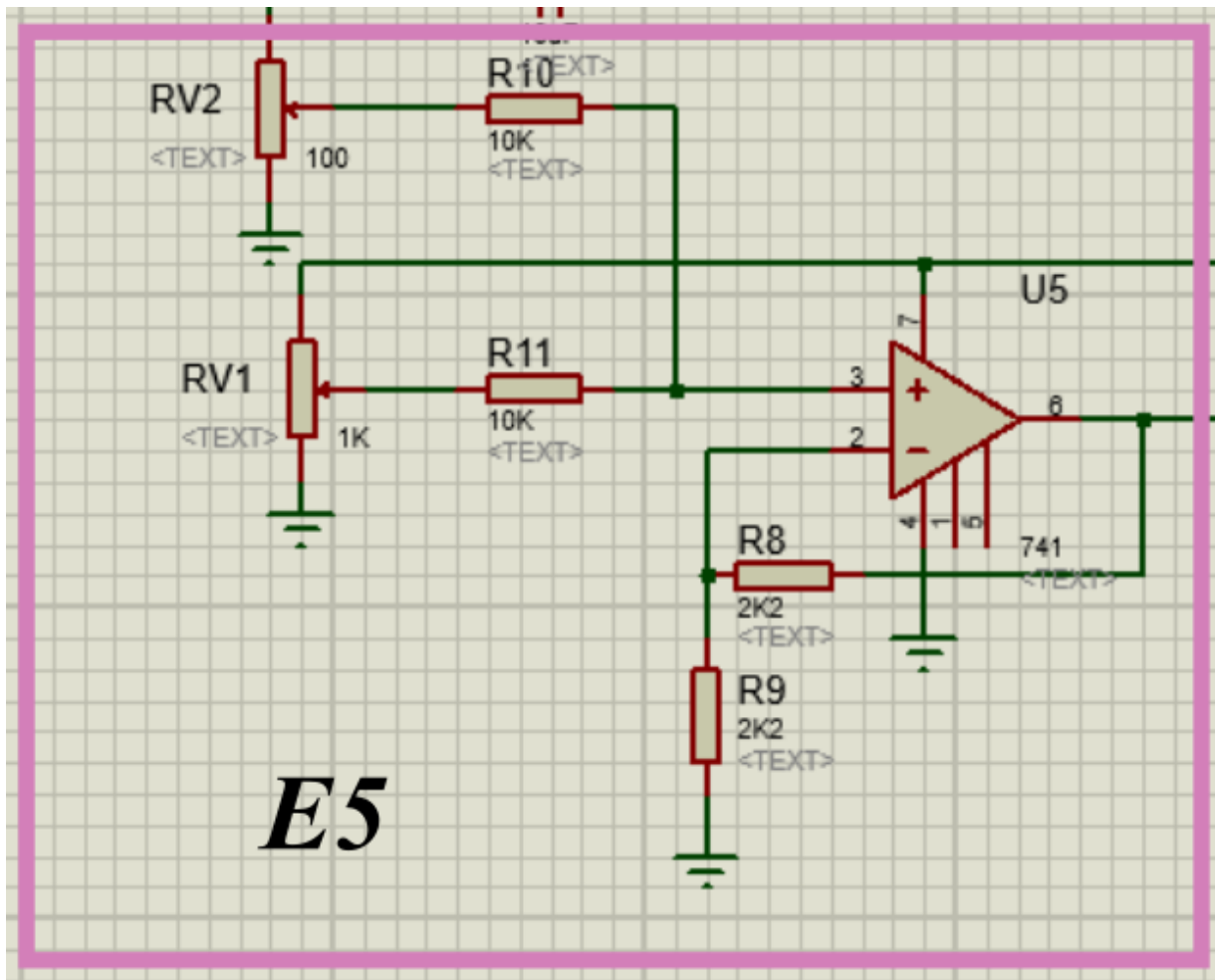


Figura 5.8: Amplificador no inversor.

Como se puede observar de la **Figura 5.9** para el rango de frecuencias de operación el amplificador inversor suma las señales ac y dc de entrada, Estos resultados confirman el correcto funcionamiento de la etapa, la cual es capaz de entregar un voltaje de salida ajustable tanto en componente alterna como continua, cuya frecuencia sinusoidal está determinada por la programación del microcontrolador. Actualmente posee un valor de 2.4V.

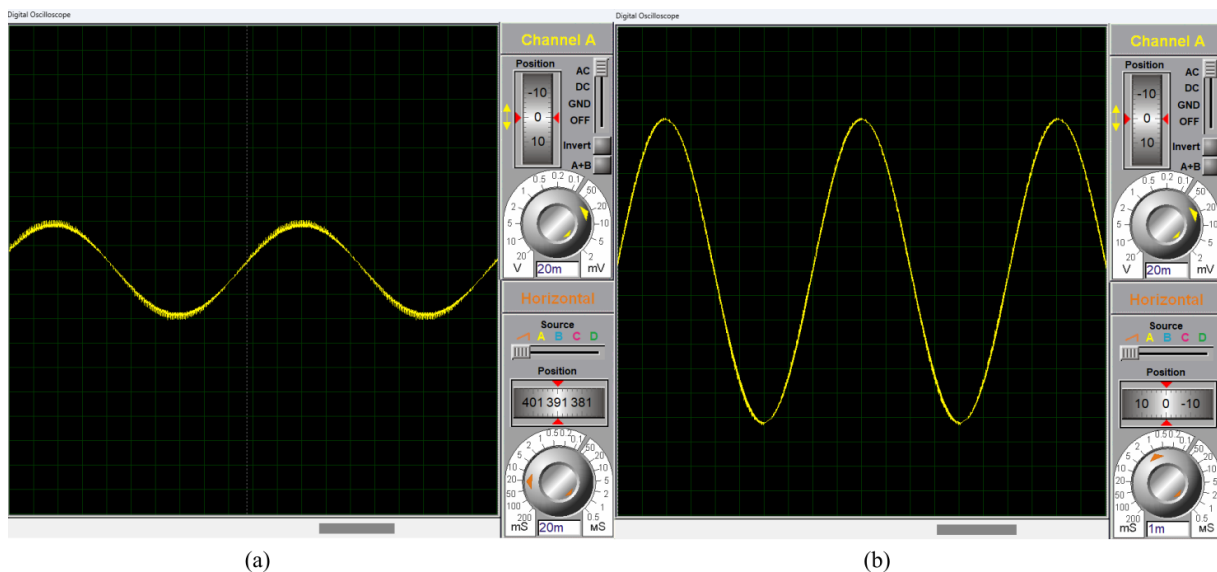


Figura 5.9: Voltaje de Salida del Filtro (a) 4.9Hz y (b) 123Hz.

5.6 Etapa E6 y E7: Fuente de corriente y Bobina Generadora de Campos Magnéticos

En esta última etapa, el voltaje proveniente de la etapa de amplificación es convertido en una corriente que circula a través de la bobina, mediante la configuración de un amplificador operacional de transconductancia, tal como se muestra en la **Figura 5.10**. Como puede observarse, el voltaje aplicado a la entrada no inversora del amplificador es igual al presente en la entrada inversora debido al principio de cortocircuito virtual. En consecuencia, dicho voltaje se replica sobre la resistencia R6, la cual, según lo calculado en el capítulo anterior, determina el valor de la corriente de salida que excita la bobina.

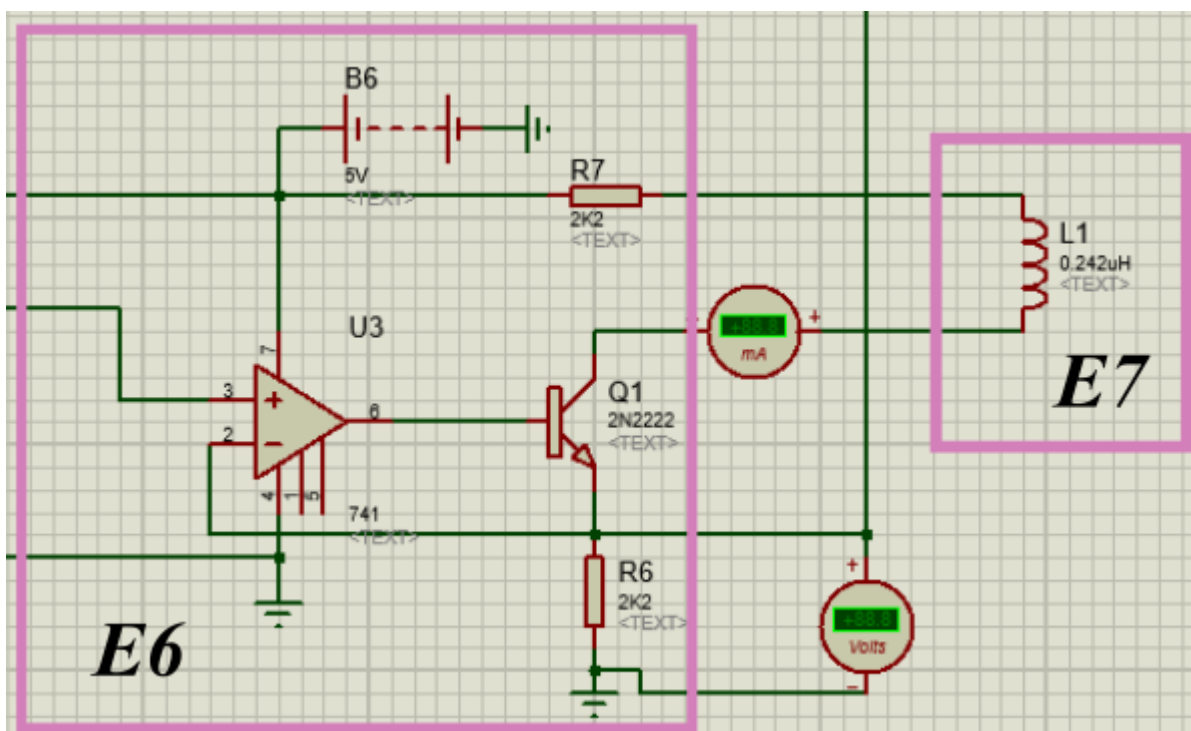


Figura 5.10: Amplificador de Transconductancia.

Para una corriente de excitación del orden de $0,012 \pm 0,007$ A, el campo magnético generado por la bobina depende directamente de sus características geométricas y del número de espiras. En el caso de una bobina de aire, esta corriente permite obtener campos magnéticos del orden de decenas de microteslas, siendo suficiente un número de espiras del orden de cientos para longitudes típicas de laboratorio. Sin embargo, la generación de campos del orden de decenas de militeslas con la misma corriente resulta impracticable utilizando una bobina de aire, ya que requeriría un número de espiras excesivamente elevado. En consecuencia, para alcanzar campos cercanos a 50 mT manteniendo una corriente de excitación baja, se hace necesario el uso de un núcleo ferromagnético de alta permeabilidad o, alternatively, un incremento significativo de la corriente de excitación, aspectos cuyos fundamentos y cálculos se desarrollan en los capítulos anteriores.

En base a los resultados obtenidos mediante simulación, se puede concluir que los objetivos planteados para el desarrollo del sistema se han cumplido satisfactoriamente. El generador de campos magnéticos programable permite producir señales senoidales

ajustables en frecuencia dentro del rango ELF, con control por software, adecuada calidad de forma de onda y niveles de corriente acordes al diseño de la bobina. Asimismo, el correcto funcionamiento de cada una de las etapas del sistema, desde la generación digital de la señal hasta la excitación en corriente de la bobina, se ha verificado, confirmando la viabilidad técnica de la solución propuesta para su aplicación en estudios experimentales.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este capítulo presenta las conclusiones generales del proyecto, las recomendaciones para futuras implementaciones y las propuestas de mejora derivadas del proceso de diseño y simulación del generador de campos magnéticos programable.

6.1 Conclusiones generales del proyecto

En la presente memoria se desarrolló el diseño y la validación, mediante simulación, de un generador de campos magnéticos programable orientado a aplicaciones experimentales en el rango de frecuencias extremadamente bajas (ELF). A través de una arquitectura modular basada en un microcontrolador AT89C51, un conversor digital–analógico DAC0808, filtros pasabanda, etapas de amplificación y una fuente de corriente para excitación de bobinas, fue posible implementar un sistema capaz de generar señales senoidales controladas en frecuencia y amplitud, cumpliendo los objetivos planteados al inicio del proyecto.

Los resultados de simulación obtenidos en el entorno Proteus 8.11 demuestran que la cadena completa de generación de señal opera de manera coherente y estable. En particular, se verificó la correcta generación de señales digitales por parte del microcontrolador, su conversión a señales analógicas mediante el DAC, la adecuada reconstrucción de la forma de onda tras la etapa de filtrado y el acondicionamiento final de la señal para la excitación de la bobina. La respuesta del sistema frente a las frecuencias mínima y máxima definidas evidencia un comportamiento consistente con el diseño teórico, confirmando la validez de los criterios de dimensionamiento utilizados.

Asimismo, la implementación de una fuente de corriente controlada permitió desacoplar parcialmente el comportamiento del sistema respecto de las variaciones de la carga inductiva, facilitando el control de la corriente aplicada a la bobina y, por ende, del campo magnético generado. Esto resulta especialmente relevante para aplicaciones experimentales, donde la reproducibilidad y el control preciso de los parámetros físicos son fundamentales.

Desde el punto de vista metodológico, el uso de simulación permitió evaluar el desempeño del sistema sin incurrir en los costos y riesgos asociados a una implementación física temprana. No obstante, también se identificaron las limitaciones inherentes a este enfoque, tales como el uso de modelos idealizados de bobinas, la ausencia de pérdidas térmicas y la imposibilidad de caracterizar directamente el campo magnético generado, aspectos que deberán ser abordados en una etapa experimental futura.

En términos generales, el proyecto cumple con los objetivos propuestos, demostrando la factibilidad técnica de un generador de campos magnéticos programable, flexible y de bajo costo relativo, orientado a estudios de interacción entre campos ELF y sistemas biológicos. El sistema desarrollado constituye una base sólida para futuras investigaciones, tanto en la implementación física del prototipo como en la realización de ensayos experimentales controlados, abriendo la posibilidad de profundizar en el análisis de los efectos de los campos magnéticos sobre material vegetal y otros sistemas de interés científico.

6.2 Recomendaciones para futuras implementaciones

A partir del desarrollo y validación del sistema mediante simulación, se recomienda que, en una eventual implementación física del prototipo, se realice una cuidadosa selección de los componentes pasivos y activos, considerando tolerancias, estabilidad térmica y comportamiento en baja frecuencia. En particular, la elección de la bobina resulta crítica, ya que sus parámetros eléctricos y geométricos influyen directamente en la intensidad y uniformidad del campo magnético generado. Por ello, se sugiere caracterizar experimentalmente la bobina antes de su uso, midiendo su inductancia, resistencia y posibles efectos de calentamiento.

Asimismo, se recomienda prestar especial atención a los aspectos de seguridad eléctrica y electromagnética durante la construcción del prototipo, especialmente en configuraciones que involucren corrientes mayores o el uso de núcleos ferromagnéticos. El cumplimiento de normativas de exposición y la incorporación de mecanismos de

protección, tales como limitadores de corriente y fusibles, contribuirán a un funcionamiento seguro y confiable del sistema.

Desde el punto de vista del software, se sugiere documentar y versionar adecuadamente el código del microcontrolador, facilitando futuras modificaciones y mejoras. Además, la calibración periódica del sistema, tanto en frecuencia como en amplitud, permitirá asegurar la reproducibilidad de los experimentos y la validez de los resultados obtenidos.

6.3 Propuestas de mejora

Como línea principal de trabajo futuro, se propone la construcción experimental del prototipo diseñado en esta memoria, con el fin de validar los resultados obtenidos en simulación bajo condiciones reales de operación. Esto permitirá evaluar efectos no considerados en el entorno simulado, tales como pérdidas térmicas, ruido electromagnético, tolerancias de los componentes y comportamiento no ideal de la bobina.

Adicionalmente, se plantea la incorporación de instrumentación específica para la medición directa del campo magnético generado, como un gaussímetro o sensores Hall calibrados, lo que permitiría correlacionar de manera más precisa la corriente de excitación con el campo producido. Esto abriría la posibilidad de realizar estudios experimentales más rigurosos y reproducibles.

Otras mejoras potenciales incluyen la ampliación del rango de frecuencias y amplitudes del sistema, la implementación de una interfaz de usuario más avanzada para el control de parámetros y la migración hacia microcontroladores más modernos que permitan mayor flexibilidad y capacidad de procesamiento. Finalmente, se propone la realización de ensayos biológicos controlados, orientados a estudiar la influencia de los campos magnéticos generados sobre sistemas vegetales, estableciendo relaciones cuantitativas entre los parámetros del campo y las respuestas fisiológicas observadas.

CAPÍTULO 7. REFERENCIAS

- [1] F. García, *Magnetic Field (MF) Applications in Plants: An Overview*. Biomagnetism Research Review, 2023. [Online]. Available: <https://drgarciabiomagnetism.com/wp-content/uploads/2023/11/Magnetic-Field-MF-Applications-in-Plants-Review.pdf>
- [2] M. H. Bukhari, et al., "Magnetic field stimulation effect on germination and antioxidant activities of presown hybrid seeds of sunflower and its seedlings," *Journal of Food Quality*, vol. 2021, Article ID 6630281, 2021.
- [3] S. M. Said, M. A. Kandil, and A. A. A. Abdelaal, "Effect of magnetic field on some biological and biochemical parameters of *Earias insulana*," *Egyptian Journal of Crop Protection*, vol. 13, no. 1, pp. 1–8, 2018.
- [4] B. Saletnik, G. Zagula, A. Saletnik, M. Bajcar, E. Słysz, and C. Puchalski, "Effect of magnetic and electrical fields on yield, shelf life and quality of fruits," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 6, Art. no. 3183, 2022, doi: 10.3390/app12063183.
- [5] A. Author et al., "Influence of magnetic field on germination, growth and production of tomato," *Agricultural Science Journal*, 2014, doi: 10.5219/349.
- [6] J. Jaroslav et al., "Research of effect of low frequency magnetic field on germination, growth and fruiting of field tomatoes," *Acta Horticulturae et Regiotecturae*, vol. 18, no. 1, pp. 1–6, 2015, doi: 10.1515/ahr-2015-0001.
- [7] A. Pazur, "Growth of etiolated barley plants in weak static and 50 Hz electromagnetic fields tuned to calcium ion cyclotron resonance," *Bioelectromagnetics*, vol. 4, no. 1, pp. 1–12, 2005, doi: 10.1186/1477-044X-4-1.
- [8] P. Faeghi, "Effects of 50 Hz electromagnetic fields on seed germination and early growth in wheat (*Triticum* spp.)," *Journal of Agricultural Science*, 2012.
- [9] R. Q. de Faria, "The effect of magneto-priming on the physiological quality of soybean seeds," *Seed Science and Technology*, 2016.
- [10] O. G. G. Knox, M. J. McHugh, J. M. Fountaine, and N. D. Havis, "Effects of microwaves on fungal pathogens of wheat seed," *Crop Protection*, vol. 50, pp. 12–16, 2013, doi: 10.1016/j.cropro.2013.03.009. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261219413000744>

- [11] Y. S. Kim et al., "Microwaves heat the soil to eliminate pests and help farmers manage soil diseases," *Phys.org*, Dec. 2023. [Online]. Available: <https://phys.org>
- [12] W. H. Ahmed, "Effect of short-time exposure to magnetic field on biology and DNA mutagenicity of the black cutworm *Agrotis ipsilon* (Lepidoptera: Noctuidae)," *Journal of Applied Entomology*, 2017.
- [13] S. Wang and J. Tang, "Radio frequency heating: a potential method for post-harvest pest control in nuts and dry products," *Journal of Zhejiang University SCIENCE*, vol. 5, no. 10, pp. 1169–1174, 2004, doi: 10.1631/jzus.2004.1169.
- [14] S. Wang et al., "Developing postharvest disinfestation treatments for legumes using radio frequency energy," *ASABE Annual International Meeting*, Paper no. 1008320, 2010.
- [15] N. Krittigamas, S. Vearasilp, D. V. Hoersten, and W. Luecke, "Radio frequency thermal treatment as an alternative insect pest control method in storage," *Journal of Stored Products Research*, vol. 48, pp. 1–7, 2012. Available: https://www.researchgate.net/publication/286556232_Radio_frequency_thermal_treatment_as_alternative_insect_pest_control_in_storage
- [16] P. Baugh, E. Medress, R. Wayland, F. Davis, P. Lemahieu, and L. Vincent, "Electromagnetic fields (EMF) for soil pest control as a methyl bromide alternative: efficacy and technology," *Proceedings of the International Conference on Alternatives to Methyl Bromide*, 1998.
- [17] D. M. Zein and A. Hussein, "Ability of magnetic field to protect wheat crops during storage," *Journal of Plant Protection Research*, vol. 59, no. 4, pp. 1–8, 2019, doi: 10.24425/jppr.2019.129740.
- [18] Ayala, kenneth & Al-janabi, Yaser. (2024). the 8051 microcontroller architecture ,programming,and application.
- [19] Atmel/Microchip, "AT89C51 Microcontroller Datasheet," Microchip Technology Inc., 2015.[Online].Available:<https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/doc0265.pdf>
- [20] Villana, Muhammad Najid. (2025). Performance Comparison of AVR and 8051 Microcontrollers: Clock Speed, Execution Time, and Instruction Set Efficiency.
- [21] Gogawale, Nikhil & Barkade, Sunil & Gadekar, Kavita. (2023). Microcontroller Melange :A Comparative Analysis.

[22] Available: <https://www.edaboard.com/threads/proteus-lcd-interfacing-video-tutorial-fo-at89c51-microcontroller.306228/>

[23] Available: <https://www.futurlec.com/Atmel/AT89C51.shtml?>

[24] Texas Instruments, *DAC0808 8-Bit Digital-to-Analog Converter*, Datasheet, rev. —, [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac0808.pdf>