



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL EFECTO DE CAMPOS ELÉCTRICOS
INTENSOS SOBRE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS**

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniero Eléctrico

**AUTORES: GALO GEOVANNY GARAY GARAY
ANDREW JOSE TORRES AÑASCO**

TUTOR: ING. PATRICIO FERNANDO URGILES ORTIZ, PhD

Cuenca - Ecuador
2025


**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA
DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Nosotros, Galo Geovanny Garay Garay con documento de identificación N° 0106995392 y Andrew José Torres Añasco con documento de identificación N° 0150553774; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 23 de febrero del 2025

Atentamente,



Galo Geovanny Garay Garay

0106995392



Andrew José Torres Añasco

0150553774

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE
AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Galo Geovanny Garay Garay con documento de identificación N° 0106995392 y Andrew José Torres Añasco con documento de identificación N° 0150553774, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: "Estudio experimental del efecto de campos eléctricos intensos sobre la propagación de ondas ultrasónicas", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 23 de febrero del 2025

Atentamente,



Galo Geovanny Garay Garay
0106995392



Andrew José Torres Añasco
0150553774

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Patricio Fernando Urgilés Ortiz con documento de identificación N° 0102137593, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL EFECTO DE CAMPOS ELÉCTRICOS INTENSOS SOBRE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS, realizado por Galo Geovanny Garay Garay, con documento de identificación N° 0106995392 y por Andrew José Torres Añasco con documento de identificación N° 0150553774, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 23 de febrero del 2025

Atentamente,



Ing. Patricio Fernando Urgilés Ortiz, PhD.
0102137593

AGRADECIMIENTO

La presente tesis está dedicada principalmente a Dios ya que gracias a él, he logrado concluir mi carrera, segundo quiero agradecer con todo mi corazón a mi familia, que incondicionalmente han estado apoyándome constantemente, a mis padres que supieron ser el pilar de apoyo cuando más necesitaba y a mis dos hermanos que me apoyaban constantemente con su cariño y no dejándome caer, y esas amistades que desde el inicio de la carrera siempre estuvimos ayudándonos mutuamente y gracias por esa amistad incondicional. Quiero agradecer a mi tutor Ing. Fernando Urgiles PhD., quien, gracias a su orientación y conocimientos compartidos, su dedicación y compromiso se pudo concluir con creces este trabajo de titulación.

Galo Geovanny Garay Garay

Con profunda gratitud, agradezco a Dios, quien me guió y fortaleció en cada paso de este camino académico, permitiéndome superar los desafíos y alcanzar esta meta. A mis padres, cuya dedicación, sacrificio y amor incondicional han sido el pilar fundamental de mi vida, gracias por darme la fuerza para soñar y luchar por mis objetivos. Al Ing. Fernando Urgiles ,PhD, mi tutor, expreso mi más sincero agradecimiento por su paciencia, orientación y valiosos conocimientos, que fueron esenciales para el desarrollo de esta investigación. A mi compañero de tesis, Galo, agradezco por su compromiso, compañerismo y esfuerzo compartido en cada etapa de este proyecto experimental. Finalmente, a todas las personas que, con su apoyo, confianza y palabras de aliento, contribuyeron de alguna manera a la culminación de este trabajo, mi más profundo agradecimiento, pues este logro es también un reflejo del esfuerzo colectivo que me acompañó en este proceso.

Andrew José Torres Añasco

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, quien ha sido mi guía y fortaleza en cada paso de este camino. Gracias a Su infinito amor y bendiciones, he logrado culminar esta etapa tan importante en mi vida.

A mi familia, quienes fueron mi pilar, quien con su amor incondicional y apoyo constante han sido mi mayor motivación. A mis padres, cuyo esfuerzo, sacrificio y palabras de aliento me dieron la fuerza para seguir adelante incluso en los momentos más difíciles. A mis hermanos, por su compañía, cariño y apoyo inagotable, quienes me recordaban siempre que nunca estaba solo en este desafío.

A esas amistades que desde el inicio de la carrera estuvieron a mi lado, compartiendo conocimientos, risas y momentos de esfuerzo. Gracias por su compañerismo y por ser parte de este viaje.

Y, con especial reconocimiento, a mi tutor, el Ing. Fernando Urgiles, PhD., por su valiosa orientación, paciencia y compromiso. Su guía y conocimientos han sido fundamentales para la culminación de este trabajo, dejando en mí un aprendizaje invaluable. A todos ustedes, gracias por ser parte de este logro.

Galo Geovanny Garay Garay

A mi padre querido, que este trabajo sea la cosecha de tu esfuerzo incansable, tus malanoches y el trabajo duro que realizas a diario. Eres para mí la definición viva de dedicación, perseverancia y el verdadero valor del sacrificio. Cada paso que doy está inspirado por el ejemplo que has sembrado en mi vida.

A mi madre querida, que este logro sea un reflejo del apoyo incondicional, la preocupación amorosa y las palabras de aliento que siempre han estado presentes. Tu paciencia infinita, tu confianza en mí y ese amor inmenso que solo una madre puede brindar fueron la fuerza que me impulsó a superar cada obstáculo.

A mi hermano querido, por ser esa constante imagen de esfuerzo y dedicación que observaba siempre desde la puerta de tu cuarto. Sin saberlo, tus logros y tu compromiso me inspiraron a buscar siempre mi mejor versión.

A mi abuelo, que aunque no está físicamente, vive en mi corazón como ejemplo de lo que significa ser un hombre en el sentido más pleno de la palabra. Sus consejos, su amor desbordante cada vez que nos veía y los recuerdos imborrables que dejó son mi guía. Sé que, desde donde esté, está orgulloso de este logro y de nosotros, sus “dudes”, porque hoy, tanto mi hermano como yo, honramos su legado con cada paso que damos.

A Paula, mi compañera, mi apoyo y mi luz en los momentos más oscuros que enfrenté en la universidad. Gracias por sacar siempre lo mejor de mí, por tu amor incondicional y por recordarme, día tras día, que incluso en los tiempos difíciles hay motivos para sonreír. Este logro también es tuyo mi amor.

A mis amigos que sin mencionarlos saben quienes son, gracias por estar siempre ahí con palabras de aliento, por las risas compartidas y por los momentos de camaradería que me ayudaron a seguir adelante cuando más lo necesitaba. Ustedes hicieron que los momentos difíciles fueran más llevaderos y los buenos, inolvidables.

A mi querido Panchito, mi fiel compañero de cuatro patas, que sin palabras supo acompañarme en cada paseo nocturno. Tu inocencia, tu amor incondicional y esa alegría al salir juntos a caminar fueron un refugio para mi mente y mi corazón. Contigo aprendí que los pequeños gestos también sanan.

Andrew Jose Torres Añasco

GLOSARIO

- CA: Corriente Alterna
- CC: Corriente Continua
- IEEE: Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
- IEC: International Electrotechnical Commission
- OFI: Optical Feedback Interference
- LDV: Laser Doppler Vibrometer
- AOM: Acoustic Optical Modulator
- UV: Radiación Ultravioleta
- EMI: Interferencia Electromagnética
- ESD: Descargas Electroestáticas
- GIE: Grupo de Investigación en Energía
- LOTO: Lock-Out – Tag-Out
- EPP: Equipo de Protección Personal
- DAQ: Sistema de Adquisición de Datos
- TOF: Time of Flight
- ADC: Convertidor analógico digital

RESUMEN

Este trabajo de titulación se centra en el estudio experimental del efecto de campos eléctricos intensos sobre la propagación de ondas ultrasónicas en medios gaseosos. Se analiza cómo la presencia de un campo eléctrico influye en la velocidad, dirección y atenuación de estas ondas, proporcionando un marco para comprender su interacción con el medio eléctrico circundante.

El proyecto abarca la revisión teórica del comportamiento de los campos eléctricos en alta tensión y su interacción con ondas mecánicas, específicamente aquellas detectadas mediante interferometría óptica de retroalimentación. Además, se consideran las normativas de seguridad aplicables a laboratorios de alta tensión, estableciendo los parámetros necesarios para la protección de equipos y personas ante fenómenos como inducciones y descargas eléctricas.

La investigación se desarrolla mediante un enfoque experimental riguroso, donde se capturan imágenes de las ondas ultrasónicas bajo la influencia de un campo eléctrico intenso y en su ausencia, empleando técnicas avanzadas de visualización. A través de este análisis, se busca caracterizar el impacto del campo eléctrico en la propagación de ondas acústicas dentro de un medio gaseoso.

Los resultados obtenidos contribuirán a la comprensión del efecto acustoeléctrico y su influencia en la propagación de ondas ultrasónicas en entornos con campos eléctricos intensos, permitiendo la representación gráfica del fenómeno en imágenes bidimensionales.

Palabras clave: alta tensión, ondas ultrasónicas, propagación, ionización, dieléctrico, interferometría óptica, normalización.

OBJETIVOS

Objetivo General: Analizar el comportamiento de las ondas ultrasónicas al atravesar un campo eléctrico generado por tensiones elevadas en CC y CA.

Objetivos Específicos

- Establecer un marco teórico sobre las ondas ultrasónicas en el aire, abordando sus propiedades fundamentales y su comportamiento de propagación, para facilitar la evaluación del impacto de campos eléctricos intensos en dichas características.
- Desarrollar una metodología para capturar imágenes de ondas ultrasónicas y analizar su comportamiento bajo la influencia de un campo eléctrico y en su ausencia, utilizando técnicas avanzadas de visualización y equipos especializados para garantizar la precisión en la medición.
- Evaluar el efecto del campo eléctrico sobre las ondas ultrasónicas en el aire, analizando cómo varían sus características de propagación, como velocidad, dirección y amplitud, bajo la influencia de un campo eléctrico de alta tensión.

Grupo Objetivo

El grupo objetivo de esta investigación incluye a profesionales, investigadores y estudiantes en acústica, ingeniería eléctrica, física aplicada y electrónica, interesados en la interacción entre ondas ultrasónicas y campos eléctricos. También está dirigido a ingenieros de instrumentación y control que requieran conocimientos sobre experimentación en alta tensión y técnicas de aislamiento eléctrico para evitar interferencias y garantizar la seguridad. Además, este estudio resulta relevante para quienes trabajan en aplicaciones industriales del ultrasonido, como inspección de materiales y monitoreo de sistemas, donde es crucial comprender el impacto de los campos eléctricos en la propagación de ondas ultrasónicas.

ÍNDICE

GLOSARIO	vii
1 MARCO TEÓRICO	2
1.1 CAMPO ELÉCTRICO	2
1.1.1 Introducción	2
1.1.2 Antecedentes	2
1.1.3 Fundamentos del Campo Eléctrico	3
1.1.4 Métodos de Visualización del Campo Eléctrico	5
1.1.5 Propiedades de Materiales en un Campo Eléctrico	6
1.1.6 Influencia del Campo Eléctrico Intenso en Materiales y Sis- temas Eléctricos	9
1.1.7 Distribución de Cargas y Polarización en Materiales Dielectricos 10	
1.1.8 Fenómenos Asociados al Campo Eléctrico	12
1.1.9 Efectos en Cables de Alta Tensión	13
1.1.10 Protección y Aislamiento en Sistemas Eléctricos	14
1.1.11 Métodos de Protección contra Campos Eléctricos Intensos	16
1.1.12 Normativas y Estándares	19
1.2 LA ONDA	19
1.2.1 Introducción	19
1.2.2 Antecedentes	20
1.2.3 Concepto de la Onda	20
1.2.4 Comportamiento de la onda	21
1.2.5 Ondas Ultrasónicas: Fundamento, Generación y Propiedades	22
1.2.6 Propagación y Características Físicas	23
1.2.7 Modos de Propagación y Atenuación	24
1.2.8 Visualización del Campo Sonoro	26
1.2.9 Teoría de la interferometría de retroalimentación óptica para detección optoacústica	27
1.2.10 Tiempo de vuelo	29
2 MÉTODO EXPERIMENTAL	32
2.1 Generación del Campo Eléctrico Intenso	32
2.1.1 Equipos y Componentes de Alta Tensión	33
2.1.2 Seguridad en el laboratorio Terco HV 9000 (Alta Tensión)	39
2.1.2.1 Principios Fundamentales de Seguridad en Alta Tensión 40	
2.1.2.2 Protocolo de Seguridad	41
2.2 Estructura para Interferometría de Retroalimentación Óptica para Detección Optoacústica	43
2.2.1 Componentes	43
2.2.2 Calibración	46

2.3	Principio de Funcionamiento	49
2.3.1	Alineación láser - Espejo	49
2.3.2	Retroalimentación Óptica	50
2.3.3	Posición Transductor Ultrasónico	51
2.4	Setup cartesiano	54
2.4.1	Componentes	54
2.5	Interfaz de posicionamiento	57
2.5.1	Arduino	57
2.5.2	LabVIEW	59
2.6	Centro de Operación	62
2.6.1	Distribución	62
2.6.2	Conexión de Equipos	63
2.7	Factores que considerar	64
2.7.1	Vista Global	71
2.8	Procesamiento de Señales	72
2.8.1	Componentes	72
2.8.2	Integración y funcionalidad conjunta:	73
2.8.3	Sincronización entre la DAQ y el Generador de Funciones	73
2.8.4	Proceso de Adquisición	75
2.9	Procesamiento de imágenes	78
2.9.1	Datos Brutos en la Adquisición de Señales	78
2.9.2	Medidas Adicionales	79
3	ANÁLISIS Y RESULTADOS	82
3.1	Imágenes de detección Óptoacústica	82
3.2	Construcción de la Imagen Bidimensional de la Propagación de Ondas Ultrasónicas	83
3.2.1	Procesamiento de Datos y Generación de la Imagen en el Do- minio del Tiempo	83
3.2.2	Transformada Rápida de Fourier y Construcción de la Imagen Espectral	85
3.2.3	Cálculo Longitud de Onda	87
3.3	Fase de Pruebas	88
3.3.1	Contorno de nivel de la Onda	90
3.4	Comparación de Imágenes 2D	91
3.5	ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO	104
3.5.1	Costo del proyecto	104
3.6	CONCLUSIONES	106
3.7	Recomendaciones	107

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Electrodos Esféricos	11
1.2	Electrodos Puntas	11
1.3	Electrodos Disco	11
1.4	Efecto corona [18]	12
1.5	Jaula de Faraday	17
1.6	Ondas en el Agua [44]	21
1.7	Representación Matemática y Gráfica de una Onda Armónica	21
1.8	Espectro Audible	23
1.9	Cono de propagación	25
1.10	Dispersión y Atenuación de la Onda Sonora	26
1.11	Diseño de la configuración acústica mediante interferometría de retroalimentación óptica basada en tomografía [43]	27
1.12	Diseño de un sistema de interferometría con retroalimentación óptica acústica [43]	28
1.13	Diagrama del modelo de tres espejos [43]	29
1.14	Esquema de detección acústica con principio OFI [43]	29
2.1	Esquema Ruptura Dieléctrica en CC [52]	32
2.2	Esquema Ruptura Dieléctrica en CA [53]	32
2.3	Laboratorio Alta Tensión	33
2.4	Modulo de control (HV 9103)	34
2.5	Transformador de prueba (HV 9105)	34
2.6	Voltímetro pico digital (HV 9150)	35
2.7	Capacitor de medida (HV 9141)	35
2.8	Barra para conexión de aluminio (HV 9108)	36
2.9	Copa Y Base de conexión de aluminio (HV 9109; HV 9110)	36
2.10	Resistor de carga (HV 9121)	36
2.11	Rectificador (HV 9111)	37
2.12	Condensador de Impulso (HV 9112)	37
2.13	Resistor de Medida (HV 9113)	38
2.14	Barra Aislante (HV 9124)	38
2.15	Pértiga de descarga (HV 9107)	38
2.16	Medidor de distancia entre chispas (HV 9133)	39
2.17	Indicadores de energización	40
2.18	Medición de resistividad de la malla del Laboratorio de Alta Tensión	41
2.19	Sensor final de carrera	42
2.20	Switches generales	42
2.21	Diodo Láser	43
2.22	Longitud de la Onda de luz	43
2.23	Haz del Diodo Láser rebotando	44

2.24	Señal Sinusoidal en Excel	44
2.25	Espejo para rebote del Diodo Láser	45
2.26	Transductor Ultrasónico	45
2.27	Estructura para interferometría con retroalimentación óptica para de- tección acústica	46
2.28	Vista lateral de estructura para Interferometria	46
2.29	Configuración generador de funciones a 40 kHz	47
2.30	Vista Frontal del sistema	47
2.31	Vista Superior del sistema	48
2.32	Estructura Ultrasónico	49
2.33	Alineación Láser-Espejo	50
2.34	Demostración de Retroalimentación Óptica	50
2.35	Señal no alineada	51
2.36	Señal de retroalimentación óptica	51
2.37	Distancias Transductor al Ultrasónico	52
2.38	Distancias entre Estructura Transductor Ultrasónico y Medidor de Brechas	52
2.39	Módulo de Interferometría de Retroalimentación Óptica para De- tección Optoacústica	53
2.40	Influencia de ultrasonido en la señal de retroalimentación óptica	53
2.41	Setup cartesiano X - Y	54
2.42	Centro de control Drivers	55
2.43	Convertidor 110 VAC - 24 VDC	55
2.44	Digital Stepper driver	56
2.45	Stepper motor	56
2.46	Prototipo para Interferometría de Retroalimentación Óptica para De- tección Optoacústica	57
2.47	Arduino Uno	57
2.48	Conexiones del Arduino Uno	58
2.49	Inferfaz Arduino Uno	58
2.50	Interfaz LabView & Arduino Uno	59
2.51	Centro de Control Virtual	60
2.52	Secuencia de operación	61
2.53	Mueble de operación	62
2.54	Distribución Mueble	63
2.55	Conexión Láser	63
2.56	Conexión Arduino - Drivers - Motores	64
2.57	Generador de Funciones a Transductor	64
2.58	Protección al diodo láser mediante carcasa 3D	65
2.59	Protección al diodo láser mediante Jaula de Faraday	66
2.60	Protección de conductores de Motores de paso	66
2.61	Jaula de Faraday para centro de comunicación	67
2.62	Aterramiento Estructura de Interferometria Óptica	67
2.63	Conductores sin etiqueta y sin protección	68
2.64	Tubería Conduit 1" instalada	68
2.65	Cablerio interno de tubería Conduit	69
2.66	Conductor de 3 hilos	69
2.67	Carcasa CPU	70

2.68	Vista Interior de Carcasa de Protección	71
2.69	Vista Global	71
2.70	Módulo NI 9223	72
2.71	Chasis CompactDAQ 9178	73
2.72	Conexión para Sincronización	74
2.73	Prueba de sincronización	75
2.74	Representación Movimiento Estructura	76
2.75	Configuración DAQ	77
2.76	Write to measurement	77
2.77	Implementación de filtros en prueba de sincronización	80
2.78	Colocación de filtro para Bloque Write to Measurement adicional	81
2.79	Centro de Control con visualizador de señal filtrada	81
3.1	Imagen en dominio del tiempo de un pixel aleatorio	83
3.2	Análisis Sinusoidal del Pixel 1	84
3.3	Imágen de la Propagación de Ondas Ultrasónicas en 2D	84
3.4	Dominio de tiempo a Espectro de frecuencia	86
3.5	Máximo Espectral	86
3.6	Máximo Espectral de la imagen de Presión Acústica	86
3.7	Presión Acústica en el Espacio	87
3.8	Longitud de Onda	88
3.9	Imágenes Bidimensionales Fase 1 y 2	89
3.10	Imágenes Bidimensionales Fase 3 - Umbralización	89
3.11	Ejemplo Contorno de Nivel	90
3.12	Contorno de Nivel a la imagen bidimensional de propagación de ondas ultrasónicas en la ROI	90
3.13	Contorno de nivel en 0 V y 65 kV	92
3.14	Imagen tridimensional de la propagación de ondas ultrasónicas	93
3.15	Visualización del frente de onda	93
3.16	Señal Senoidal de un pixel aleatorio	94
3.17	Diferencia de las señales filtradas	95
3.18	FFT de la diferencia de las señales	95
3.19	Presión acústica de la FFT de la diferencia de las señales.	96
3.20	Comparación y la diferencia de los FFT de 0V y de 65kV	97
3.21	FFT y presión acústica de onda de 0V	97
3.22	FFT y presión acústica de onda de 65kV	97
3.23	Diferencia de la presión acústica	98
3.24	Imágenes originales con escala 1	98
3.25	Imágenes filtradas con escala 1	99
3.26	Imagen de la onda bajo tensión de 65kV con valores atípicos	99
3.27	Imagen normalizad a escala 1 con poca visibilidad de la onda	100
3.28	Imagen normalizad a escala 1 con mayor visibilidad de la onda	100
3.29	Imagen guía de la onda a 0V	101
3.30	Resta de la imagen guía y de la imagen de onda bajo tensión de 65kV	102
3.31	Suma de la imagen guía y de la imagen de onda bajo tensión de 65kV	103
3.32	Apantallamiento fin de carrera	112
3.33	Fines de Carrera del Eje Y	113
3.34	Fines de Carrera del Eje X	113

Índice de tablas

1.1	Valores típicos de resistividad y conductividad en materiales	7
1.2	Valores de permitividad relativa	7
1.3	Permeabilidad relativa para materiales comunes	8
1.4	Valores típicos de rigidez dieléctrica para materiales comunes	8
1.5	Designación de la tensión de CA de uso máximo [33]	17
1.6	Designación de la tensión de CC de uso máximo [33]	18
3.1	Dimensión de la Región de Interés y Cantidad de Datos Adquiridos	82
3.2	Tensiones aplicadas en los ensayos	89
3.3	Generación Campo Eléctrico Intenso (Laboratorio Alta Tensión)	105
3.4	Setup: Eje Cartesiano X - Y	105
3.5	Setup: Método de la Interferometría de Retroalimentación Óptica para Detección Optoacústica	105
3.6	Estudio Experimental del Efecto de Campos Eléctricos Intensos sobre la Propagación de Ondas Ultrasónicas	106
3.7	Áreas del Trabajo de Grado	114

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el estudio de los campos eléctricos de alta tensión y su interacción con diversos medios continúa siendo un área clave de la ingeniería eléctrica. Los campos eléctricos intensos tienen un impacto significativo en la propagación de ondas a través de diferentes materiales, lo que ha generado un creciente interés en su influencia sobre las ondas ultrasónicas. Esta interacción no solo es de interés teórico, sino que también tiene aplicaciones directas en el diseño y desarrollo de tecnologías de vanguardia, como sistemas de control avanzado, sensores industriales y dispositivos de transmisión de energía de alta eficiencia.

Este trabajo de titulación tiene como objetivo realizar un estudio experimental que explore cómo los campos eléctricos de alta tensión afectan la propagación de ondas ultrasónicas en el aire. El foco principal del proyecto es entender cómo las ondas, al interactuar con campos de alta tensión, experimentan cambios en su velocidad, atenuación y en su comportamiento general. Este análisis permite conocer con mayor precisión cómo se transmiten las ondas a través de diferentes medios, bajo la influencia de campos eléctricos, contribuyendo a una comprensión más profunda de los principios físicos involucrados.

A través de una metodología que combina la teoría de los campos eléctricos y experimentación controlada en laboratorio, se busca observar y cuantificar los efectos que los campos eléctricos intensos tienen sobre la propagación de ondas ultrasónicas. Esto incluirá el análisis de las ondas en presencia de corriente alterna (CA) y corriente continua (CC), para determinar cómo se modifican sus propiedades al interactuar con el medio. Este enfoque tiene como fin proporcionar una base sólida de conocimiento acerca de la interacción entre las ondas y los campos eléctricos en diversos entornos.

El presente documento presenta los antecedentes que fundamentan la importancia del estudio, la justificación del proyecto, los objetivos planteados, el marco teórico que sustenta la investigación y la metodología utilizada. Este trabajo busca contribuir al entendimiento teórico y experimental de cómo los campos eléctricos de alta tensión afectan el comportamiento de las ondas ultrasónicas, sin centrarse en aplicaciones tecnológicas, sino en el análisis físico fundamental de este fenómeno.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 CAMPO ELÉCTRICO

1.1.1 Introducción

El campo eléctrico es un concepto fundamental en la física moderna que describe la influencia que las cargas eléctricas ejercen en el espacio circundante. Introducido por Michael Faraday en la década de 1830, el campo eléctrico permite la comprensión de las interacciones a distancia entre objetos cargados sin necesidad de contacto directo. Esta noción revolucionó la forma en que se concebían las fuerzas eléctricas, anteriormente vistas como acciones instantáneas similares a las fuerzas gravitacionales. Faraday propuso que las cargas eléctricas modifican el espacio alrededor de ellas, generando lo que denominó líneas de fuerza, que constituyen el campo eléctrico responsable de las fuerzas experimentadas por otras cargas dentro de su influencia [1].

1.1.2 Antecedentes

El estudio del campo eléctrico ha sido esencial en el desarrollo de la física desde el siglo XIX, comenzando con las ideas de Michael Faraday sobre las líneas de fuerza, las cuales describían cómo las cargas eléctricas interactúan a través de un campo invisible [2]. Esta noción fue formalizada por James Clerk Maxwell, cuyas ecuaciones proporcionaron el marco teórico del electromagnetismo, relacionando los campos eléctricos y magnéticos con la materia [3]. En la segunda mitad del siglo XIX y principios del XX, científicos como Nikola Tesla y Lord Kelvin comenzaron a experimentar con campos eléctricos de alta tensión, observando fenómenos como el arco eléctrico y la ruptura dieléctrica, eventos que demuestran la influencia de los campos en el comportamiento de los materiales. Tesla, a través de sus investigaciones en corriente alterna y sus experimentos con bobinas de alta tensión, mostró cómo los campos eléctricos pueden generar ionización en gases, como el aire, produciendo descargas eléctricas [4].

A lo largo del siglo XX, los avances en la comprensión de la electrostática y los campos eléctricos de alta tensión permitieron el desarrollo de tecnologías que

aprovechaban los efectos de polarización e inducción electromagnética. Por ejemplo, Robert Van de Graaff, con su generador de alta tensión, permitió estudiar los efectos de los campos sobre los conductores y materiales dieléctricos, como la ionización del aire y la ruptura dieléctrica, fenómenos críticos para el diseño de dispositivos como aceleradores de partículas y generadores de energía de alta tensión [5]. Estos avances también mostraron cómo los campos eléctricos influyen en la polarización de materiales, alterando las propiedades eléctricas de los materiales en función de su capacidad para almacenar energía eléctrica.

Durante las décadas de 1960 y 1970, científicos como Oleg Jefimenko investigaron los efectos de los campos eléctricos sobre los cuerpos conductores y no conductores. Sus estudios sobre inducción electromagnética revelaron cómo los campos eléctricos pueden inducir corrientes en materiales, modificando sus propiedades eléctricas y afectando la propagación de ondas en diferentes medios [6]. Estos estudios fueron esenciales para comprender cómo los campos eléctricos afectan la conductividad de los materiales y sus interacciones en el entorno, lo que ha sido fundamental para el diseño de tecnologías que emplean campos eléctricos en procesos industriales y en el estudio de materiales a nivel molecular y atómico.

Hoy en día, la investigación sobre los campos eléctricos continúa siendo de gran relevancia, especialmente en áreas como la generación de plasma y la manipulación de materiales a nivel atómico. Las investigaciones actuales siguen profundizando en los efectos de los campos eléctricos en la ruptura dieléctrica del aire, la ionización de gases y la inducción electromagnética, que tienen aplicaciones directas en sectores industriales como la transmisión de energía y la fabricación de dispositivos de alta tensión. Los experimentos históricos, como los realizados con limaduras de hierro para visualizar el comportamiento de las líneas de campo, continúan siendo útiles para la comprensión de la interacción entre cargas y el comportamiento de los campos en diferentes medios, lo que sigue siendo crucial para la innovación tecnológica.

1.1.3 Fundamentos del Campo Eléctrico

- **Definición y Fórmula del Campo Eléctrico.**

El campo eléctrico \mathbf{E} en un punto específico del espacio se define matemáticamente como la fuerza \mathbf{F} experimentada por una carga de prueba q , dividida por la magnitud de esta carga:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q}, \quad (1.1)$$

donde:

\mathbf{E} es el campo eléctrico en el punto de interés.

\mathbf{F} es la fuerza que experimenta una carga de prueba q .

q es la magnitud de la carga de prueba.

Esta definición implica que el campo eléctrico está presente en todo el espacio, aun en ausencia de otras cargas [7].

- **Ley de Coulomb y Campo Eléctrico de una Carga Puntual**

La fuerza eléctrica \mathbf{F} está estrechamente relacionada con la Ley de Coulomb, que establece que la magnitud de la fuerza entre dos cargas puntuales es proporcional al producto de sus cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa; formulada por Charles-Augustin de Coulomb en 1785, esta ley es un pilar esencial para la comprensión de las interacciones eléctricas [8]. La expresión matemática de la Ley de Coulomb es:

$$\mathbf{F} = k_e \frac{|q_1 q_2|}{r^2}, \quad (1.2)$$

donde:

\mathbf{F} es la magnitud de la fuerza entre las dos cargas.

k_e es la constante de Coulomb ($8.99 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2$).

q_1 y q_2 son las magnitudes de las cargas.

r es la distancia entre las cargas.

Así, el campo eléctrico generado por una carga puntual q_1 en una posición a distancia r se calcula utilizando la Ley de Coulomb en combinación con la definición del campo eléctrico:

$$\mathbf{E} = k_e \frac{|q_1|}{r^2} \quad (1.3)$$

Este campo tiene una dirección radial: se extiende hacia fuera si la carga es positiva y hacia dentro si es negativa. Por lo tanto, el campo eléctrico actúa como una fuerza de campo, describiendo cómo las cargas influyen en el espacio circundante y, a su vez, afectan a otras cargas dentro de su alcance [8].

- **Potencial Eléctrico y Energía en un Campo Eléctrico**

Además del campo eléctrico, es crucial comprender el concepto de potencial eléctrico, el cual está estrechamente relacionado con la energía almacenada en un sistema de cargas [9]. El potencial eléctrico V en un punto se define como el trabajo realizado para mover una carga de prueba desde el infinito hasta ese punto, dividido por la magnitud de la carga:

$$V = \frac{W}{q}, \quad (1.4)$$

donde:

V potencial eléctrico

W es el trabajo realizado en el movimiento de la carga.

q es la magnitud de la carga de prueba.

Dado que el potencial eléctrico es una magnitud escalar, su uso simplifica el análisis de la energía en un campo eléctrico. La energía potencial eléctrica asociada a una carga q en un punto con potencial V está dada por:

$$U = qV \tag{1.5}$$

Cuando una carga se desplaza en un campo eléctrico, su energía potencial eléctrica cambia en función de la diferencia de potencial entre los puntos inicial y final [9]. Este principio es fundamental en el diseño y análisis de dispositivos eléctricos y electrónicos, ya que permite calcular la energía almacenada en un campo eléctrico y el trabajo realizado al mover cargas a través de él.

- **Relación entre el Campo Eléctrico y el Potencial Eléctrico**

El campo eléctrico también puede expresarse en términos del gradiente del potencial eléctrico. Matemáticamente, esta relación se describe como:

$$\mathbf{E} = -\nabla V, \tag{1.6}$$

donde:

\mathbf{E} es el campo eléctrico.

∇V representa el gradiente del potencial eléctrico.

Esta ecuación indica que el campo eléctrico apunta en la dirección de mayor disminución del potencial eléctrico y su magnitud es proporcional a la tasa de cambio del potencial en el espacio. En términos físicos, esto significa que las cargas positivas se desplazan naturalmente desde regiones de alto potencial hacia regiones de menor potencial, mientras que las cargas negativas siguen la dirección opuesta [7].

1.1.4 Métodos de Visualización del Campo Eléctrico

A lo largo de la historia, la visualización de los campos eléctricos ha sido un reto significativo para los científicos. A diferencia de magnitudes físicas como la temperatura o la velocidad, los campos eléctricos son invisibles al ojo humano y no tienen una manifestación visual directa. Esto ha llevado a la creación de diversas representaciones gráficas para comprender mejor su comportamiento.

Líneas de Campo Eléctrico

Uno de los primeros y más conocidos métodos de visualización es el uso de líneas de campo eléctrico, una idea introducida por Michael Faraday para describir gráficamente cómo una carga eléctrica afecta a otras en su entorno. Estas líneas imaginarias representan la trayectoria que seguiría una carga de prueba positiva si se colocara en un punto del espacio bajo la influencia de un campo eléctrico [10].

Interpretación de las Líneas de Campo

- Las líneas de campo emergen de las cargas positivas y se dirigen hacia las cargas negativas.

- La densidad de las líneas en una región determinada indica la intensidad del campo: donde las líneas están más juntas, el campo es más fuerte.

- Aunque las líneas de campo eléctrico son una construcción conceptual, siguen siendo una herramienta poderosa para visualizar la distribución del campo en distintas configuraciones.

Superficies Equipotenciales

Otro método ampliamente utilizado es el uso de superficies equipotenciales. Estas superficies conectan todos los puntos que tienen el mismo potencial eléctrico, proporcionando una representación tridimensional de la variación del potencial en un campo eléctrico [10].

Propiedades de las Superficies Equipotenciales

- Son siempre perpendiculares a las líneas del campo eléctrico.
- Ayudan a visualizar cómo se distribuye la energía en el espacio.
- Son especialmente útiles en el estudio de campos eléctricos generados por múltiples cargas o distribuciones continuas de carga, como placas cargadas o esferas conductoras.

1.1.5 Propiedades de Materiales en un Campo Eléctrico

• Resistividad, Conductividad y Materiales Dieléctricos

La resistividad eléctrica (ρ) describe la oposición interna de un material al flujo de corriente eléctrica. Los materiales con baja resistividad, como los metales, son buenos conductores, mientras que los de alta resistividad actúan como aislantes. La resistividad depende de factores como la temperatura y la estructura interna del material. Para los metales, aumenta con la temperatura debido a la dispersión de electrones causada por la vibración atómica [11].

Fórmula de Resistividad

$$\rho = R \frac{A}{L}$$

donde:

ρ es la resistividad eléctrica ($\Omega \cdot m$).

R es la resistencia eléctrica del material (Ω).

A es el área transversal de la sección del conductor (m^2).

L es la longitud del conductor (m).

La conductividad eléctrica (σ) es el inverso de la resistividad y mide la facilidad con la que un material permite el paso de corriente. Determinada por la siguiente fórmula:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (1.7)$$

donde:

σ es la conductividad eléctrica (S/m).

ρ es la resistividad ($\Omega \cdot m$).

Tabla 1.1: Valores típicos de resistividad y conductividad en materiales

Material	Resistividad (ρ) [$\Omega \cdot m$]	Conductividad (σ) [S/m]
Cobre	1.68×10^{-8}	5.96×10^7
Aluminio	2.82×10^{-8}	3.5×10^7
Vidrio	$10^{10} - 10^{14}$	$10^{-11} - 10^{-15}$
Madera	$10^8 - 10^{11}$	$10^{-14} - 10^{-16}$

• Materiales Dieléctricos: Permitividad y Permeabilidad

Permitividad

La permitividad (ε) describe la capacidad de un material para almacenar energía eléctrica en un campo eléctrico y se define como:

$$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \quad (1.8)$$

donde:

ε Permitividad del material (F/m).

ε_0 Permitividad del vacío ($8.85 \times 10^{-12} F/m$).

ε_r Permitividad relativa del material (adimensional).

Tabla 1.2: Valores de permitividad relativa

Material	Permitividad Relativa (ε_r)	Tipo
Aire	1.00059	Gas
Vidrio	4-10	Aislante
Madera	2-3	Aislante

Permeabilidad Magnética

La permeabilidad magnética (μ) indica la capacidad de un material para soportar un campo magnético. Se calcula de la siguiente manera:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad (1.9)$$

donde:

μ es la permeabilidad del material (H/m).

μ_0 es la permeabilidad del vacío ($4\pi \times 10^{-7} H/m$).

μ_r es la permeabilidad relativa del material (adimensional).

Tabla 1.3: Permeabilidad relativa para materiales comunes

Material	Permeabilidad Relativa (μ_r)	Tipo
Vacío	1	No Magnético
Aire	1	Paramagnético extr. débil
Aluminio	1.000022	Paramagnético débil
Madera	1	Diamagnético

• Rigidez Dieléctrica y Polarización

La rigidez dieléctrica es el campo eléctrico máximo que un material dieléctrico puede soportar sin permitir la conducción [12]. Su ecuación es:

$$E_{\text{máx}} = \frac{V}{d} \quad (1.10)$$

donde:

$E_{\text{máx}}$ Rigidez dieléctrica (V/m).

V Voltaje aplicado en voltios (V).

d Distancia entre las placas (m).

Tabla 1.4: Valores típicos de rigidez dieléctrica para materiales comunes

Material	Rigidez Dieléctrica [kV/mm]	Tipo
Madera	2-10	Aislante sólido
Mica	100-300	Aislante sólido
Aire	3	Aislante gaseoso
Aceite Mineral	10-15	Aislante líquido
Papel Mylar	400-600	Aislante sólido

Polarización de Materiales

La polarización ocurre cuando un campo eléctrico desplaza cargas en un material, creando dipolos que afectan su comportamiento como capacitador, la magnitud de la polarización depende de la susceptibilidad eléctrica (χ_e) del material [13]. La fórmula para la polarización es:

$$P = \chi_e \cdot \epsilon_0 \cdot \mathbf{E}, \quad (1.11)$$

donde:

- P Polarización (C/m^2).
- ε_0 Permitividad del vacío, ($8.85 \times 10^{-12} F/m$).
- χ_e Susceptibilidad eléctrica del material (adimensional).
- \mathbf{E} Campo eléctrico (V/m).

1.1.6 Influencia del Campo Eléctrico Intenso en Materiales y Sistemas Eléctricos

- **Influencia del Campo Eléctrico en el Medio**

Cuando un campo eléctrico intenso interactúa con un medio material, altera sus propiedades eléctricas, afectando principalmente la permitividad y la densidad de carga. La permitividad, denotada como ε , mide la capacidad del material para almacenar energía eléctrica en un campo y puede modificarse bajo la influencia de campos eléctricos intensos.

El desplazamiento de cargas inducido por el campo genera un efecto de polarización, alterando la distribución interna de cargas y la respuesta eléctrica del material [14]. En materiales dieléctricos, este fenómeno puede generar efectos no lineales en la propagación del campo eléctrico.

- **Densidad de carga y polarización**

La densidad de carga puede verse modificada por un campo eléctrico intenso debido a la separación de cargas dentro del medio. Esto puede incrementar la densidad de carga superficial en las interfaces del material [7]. La densidad de carga se expresa como:

$$\sigma = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E}, \quad (1.12)$$

donde:

- σ Densidad de carga superficial en el material (C/m^2).
- ε_0 Permitividad del vacío (F/m).
- ε_r Constante dieléctrica relativa del material (adimensional).
- \mathbf{E} Campo eléctrico aplicado (V/m).

Esta relación demuestra que la densidad de carga en un medio polarizable está directamente relacionada con la permitividad del material y la magnitud del campo eléctrico aplicado.

La polarización es el proceso mediante el cual un material se vuelve eléctricamente asimétrico como resultado de la aplicación de un campo eléctrico [10]. En un medio dieléctrico, la polarización se puede expresar en términos de la polarización eléctrica \mathbf{P} , que representa el dipolo eléctrico por unidad de volumen. La relación entre la polarización y el campo eléctrico se describe mediante:

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) \mathbf{E} \quad (1.13)$$

donde:

P Polarización del material (C/m^2).

ϵ_0 Permitividad del vacío (F/m).

ϵ_r Constante dieléctrica relativa del material (adimensional).

E Campo eléctrico aplicado (V/m).

Esto indica que la polarización es proporcional a la intensidad del campo eléctrico y a la diferencia entre la permitividad del material y la del vacío.

- **Influencia en la propagación de ondas**

La influencia del campo eléctrico en la polarización también repercute en la velocidad de propagación de las ondas a través del medio, la velocidad de una onda electromagnética en un medio se relaciona con la permitividad y la permeabilidad del material mediante la ecuación:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}, \quad (1.14)$$

donde:

v Velocidad de la onda (m/s).

ϵ Permitividad del medio (F/m).

μ Permeabilidad del medio (H/m).

Esta relación destaca cómo la interacción entre el campo eléctrico y el medio afecta la propagación de las ondas electromagnéticas, lo que tiene implicaciones significativas en diversas aplicaciones tecnológicas, desde la comunicación hasta la energía eléctrica.

1.1.7 Distribución de Cargas y Polarización en Materiales Dieléctricos

En aplicaciones de alta tensión, el campo eléctrico intenso induce un proceso de polarización en los dieléctricos, reorganizando las cargas internas en función de la geometría y el tipo de electrodos utilizados [15]. Los electrodos empleados en estudios de alta tensión incluyen:

- **Electrodos de Esfera:** Ofrecen una distribución de campo relativamente homogénea en un espacio tridimensional, siendo útiles para estudios que requieren una carga distribuida de forma uniforme y menos concentración en los bordes.



Figura 1.1: Electrodo Esférico

- **Electrodos de Punta:** Son conocidos por generar concentraciones de campo eléctrico muy intensas en sus extremos, facilitando la evaluación de puntos de ruptura dieléctrica localizada debido al elevado gradiente de campo en áreas puntuales.

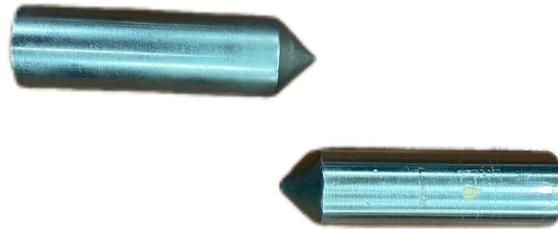


Figura 1.2: Electrodo Puntas

- **Electrodos de Disco (Planos):** Los electrodos de disco se caracterizan por una distribución relativamente uniforme del campo eléctrico en la región central de la superficie plana del dieléctrico, con una concentración creciente en los bordes debido a la curvatura [15]. Esta configuración reduce el riesgo de picos de campo en comparación con electrodos puntiagudos, pero aún presenta acumulación de cargas en los bordes, lo que puede llevar a la ruptura dieléctrica si el campo supera el umbral de rigidez del material.

La geometría plana de los electrodos facilita la observación de fenómenos como la polarización dieléctrica, en la que las moléculas del dieléctrico se alinean y sus cargas se desplazan ligeramente bajo un campo eléctrico intenso [16]. Aunque esta polarización permite al material almacenar energía sin ruptura inmediata, las pequeñas imperfecciones o contaminantes en la superficie pueden generar "puntos calientes", acelerando la ruptura en los bordes del electrodo [15].



Figura 1.3: Electrodo Disco

Almacenamiento de Energía y Polarización Dieléctrica

Antes de la ruptura, los electrones en el dieléctrico están en sus posiciones de equilibrio, donde las fuerzas de atracción entre las cargas positivas del núcleo y los electrones equilibran la repulsión eléctrica entre los electrones. Cuando se aplica un campo intenso, estos electrones experimentan una fuerte fuerza que los empuja en dirección opuesta al campo eléctrico. Este fenómeno de desplazamiento se llama polarización dieléctrica.

Durante esta fase, los electrones no se separan completamente de sus átomos o moléculas, pero sí se desplazan ligeramente, creando un momento dipolar inducido en el material. A medida que el campo eléctrico alcanza valores cercanos al umbral de ruptura, estos desplazamientos aumentan, y algunos electrones pueden incluso ganar suficiente energía para escapar de sus posiciones estables, contribuyendo a una ionización parcial del material [15].

1.1.8 Fenómenos Asociados al Campo Eléctrico

- **Efecto Corona**

El efecto corona ocurre en conductores de alta tensión cuando el campo eléctrico supera un umbral crítico, ionizando el aire circundante. Este fenómeno es más frecuente en condiciones de alta humedad o contaminación, formando una nube de corona compuesta por electrones libres e iones positivos. Aunque las pérdidas de energía son pequeñas, pueden ser significativas en líneas de transmisión en ambientes húmedos, además de generar ruido en forma de zumbido o chisporroteo e interferencias electromagnéticas [17]. La exposición prolongada puede dañar los conductores y exigir mantenimiento frecuente. Sin embargo, se aprovecha en aplicaciones como ionizadores y purificadores de aire.

Para mitigar sus efectos, se optimiza la geometría de los conductores, utilizando de mayor diámetro, y se aplican recubrimientos que aumentan la rigidez dieléctrica y reducen la acumulación de contaminantes. Un mantenimiento regular es clave para evitar fallas.

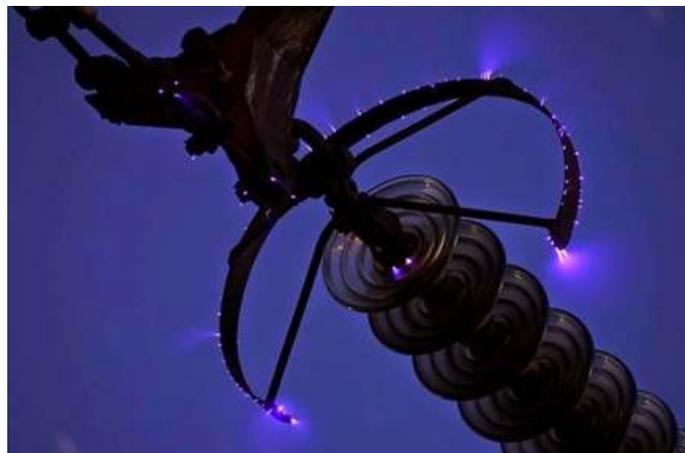


Figura 1.4: Efecto corona [18]

- **Descargas Parciales**

Las descargas parciales son fenómenos eléctricos que ocurren en sistemas de alta tensión, causadas por la ionización del aire o materiales dieléctricos cuando el campo eléctrico supera la rigidez dieléctrica, pero sin causar una ruptura completa. Se presentan en aislantes como transformadores y cables [19]. Estas descargas se manifiestan como arcos o chispas.

Aunque son fenómenos localizados, las descargas parciales pueden dañar significativamente los materiales aislantes, erosionándolos con el tiempo y dificultando su detección. Por lo tanto, la monitorización temprana es crucial para prevenir fallos graves [19]. Se emplean técnicas como la monitorización de corriente, detección acústica y análisis de luz ultravioleta. Las normativas internacionales, como las de la IEC y IEEE, establecen directrices para medir y controlar las descargas parciales.

- **Ruptura Dieléctrica**

La ruptura dieléctrica es el fenómeno en el que un material aislante deja de ser eléctricamente resistente y permite el paso de corriente cuando el campo eléctrico aplicado excede su rigidez dieléctrica. En medios gaseosos, como el aire, la ionización de las moléculas genera una conducción súbita, formando un arco eléctrico [17].

Este fenómeno depende de factores como la intensidad del campo eléctrico, la composición del medio, la humedad y la geometría de los electrodos. En sistemas eléctricos, la ruptura dieléctrica puede provocar fallos en aisladores, cables y equipos de alta tensión, lo que resalta la importancia de diseñar dispositivos con márgenes de seguridad adecuados [20].

- **Distorsión del medio**

Kuffel [16] señala que los sistemas eléctricos de alta tensión son fundamentales para la transmisión de energía, pero los campos eléctricos intensos generados pueden alterar las propiedades físicas y eléctricas de los materiales cercanos, causando distorsión. Esto incluye la ruptura dieléctrica, que convierte materiales aislantes en conductores y puede dañar equipos como transformadores, y la ionización del aire, que favorece la formación de arcos eléctricos peligrosos. Además, los efectos térmicos derivados de campos eléctricos intensos pueden debilitar los materiales aislantes, lo que lleva a la fatiga térmica y fallos del sistema. Para mitigar estos efectos, es esencial elegir materiales adecuados, diseñar los componentes con precisión y realizar inspecciones periódicas.

1.1.9 Efectos en Cables de Alta Tensión

Los cables de alta tensión, fundamentales para la transmisión de electricidad, están sujetos a tensiones eléctricas, térmicas y mecánicas a lo largo de su vida útil. Estos factores pueden degradar el aislamiento, reducir la rigidez dieléctrica del material y aumentar el riesgo de fallos eléctricos, como cortocircuitos y rupturas [21].

- **Calentamiento por Resistencia Eléctrica**

Uno de los efectos más significativos es el calentamiento del conductor debido a la resistencia eléctrica (R). Este fenómeno genera calor proporcional a la corriente I que fluye a través del conductor ($P = I^2R$). Si el calor generado no se disipa adecuadamente, puede afectar la integridad del cable y derivar en fallos en la red eléctrica [22].

- **Efectos de la Temperatura y la Humedad**

La temperatura elevada acelera la degradación del material aislante, reduciendo su vida útil. En cables subterráneos, la humedad puede causar la ionización del agua, generando caminos de baja resistencia que favorecen la formación de arcos eléctricos [23].

- **Mitigación de Efectos Capacitores**

Para reducir los efectos capacitivos y las corrientes parásitas, se emplean técnicas como la instalación de cables de tierra y sistemas de compensación reactiva, que optimizan el rendimiento de la red eléctrica [23].

- **Contaminación del Aislante**

Los contaminantes como polvo, salitre o productos químicos pueden generar descargas superficiales, disminuyendo la efectividad del aislamiento y aumentando la probabilidad de fallos prematuros [21].

- **Efecto Capacitivo en los Cables**

Los cables de alta tensión presentan un efecto capacitivo que afecta la distribución del voltaje en el sistema, generando corrientes parásitas que reducen la eficiencia operativa [24].

1.1.10 Protección y Aislamiento en Sistemas Eléctricos

- **Aislamiento en Sistemas Eléctricos**

El aislamiento en sistemas eléctricos es un componente fundamental para la seguridad y el funcionamiento eficiente de las instalaciones eléctricas. Consiste en mantener las partes activas (conductoras de electricidad) separadas mediante materiales no conductores para evitar la conducción no deseada de corriente, descargas eléctricas peligrosas y cortocircuitos [25]. Además, el aislamiento adecuado permite la reducción de pérdidas de energía y asegura una vida útil más larga de los equipos eléctricos. En entornos industriales o de alta tensión, el aislamiento adquiere un papel crítico, ya que protege tanto los equipos como al personal que opera cerca de ellos [26].

Tipos de Aislamiento

Existen varios tipos de aislamiento que se implementan en los sistemas eléctricos según el tipo de corriente, la magnitud de voltaje, el entorno y los posibles riesgos de interferencia o daño por sobrecalentamiento.

- **Aislamiento Eléctrico:** El aislamiento eléctrico se basa en materiales de alta resistencia como goma, plástico, porcelana, vidrio templado y polímeros modernos, que rodean los conductores para evitar fugas de corriente. Se clasifica según su capacidad para resistir voltajes y temperaturas. En sistemas de media y alta tensión se usan polímeros termoplásticos o elastómeros, mientras que en baja tensión se utiliza goma o PVC [27].
- **Aislamiento Térmico:** En sistemas eléctricos de alta potencia, el paso de corriente genera calor debido a la resistencia interna de los conductores. Para evitar sobrecalentamientos, se utilizan materiales de aislamiento térmico como fibra de vidrio, asbesto y espumas cerámicas, que soportan altas temperaturas sin descomponerse [28]. Este aislamiento es esencial en transformadores, motores eléctricos y cables de sistemas de alta potencia.
- **Materiales Refractarios:** En ciertos equipos eléctricos de alta potencia, como los transformadores de potencia, se emplean materiales con alta resistencia al calor (como micas o fibras cerámicas) para rodear las partes que generan calor, manteniendo aislada la corriente eléctrica del aumento de temperatura. Estos materiales se usan en las envolturas de los conductores y en las cajas de los equipos [29].
- **Aislamiento Electromagnético:** En los sistemas eléctricos de alta potencia y en dispositivos electrónicos sensibles, el aislamiento electromagnético juega un papel crucial ante las interferencias electromagnéticas (EMI), que son perturbaciones que pueden alterar el funcionamiento de dispositivos cercanos debido a la radiación de campos eléctricos/magnéticos. Para evitar esto, se utilizan filtros, blindajes electromagnéticos y materiales de apantallamiento que impiden que las ondas electromagnéticas afecten a otros componentes [28].

Además, en la industria de telecomunicaciones y sistemas de control, este tipo de aislamiento es esencial para garantizar la precisión de la transmisión de datos y señales, evitando el ruido electromagnético. Algunos métodos empleados son:

- * Filtros EMI
- * Blindaje Electromagnético
- * Jaula de Faraday
- * Apantallamiento activo
- * Aislamiento galvánico

- **Aislamiento Electrostático:** Es importante para evitar la acumulación de cargas eléctricas estáticas en los componentes, que podrían causar descargas electroestáticas (ESD) y daños a los equipos sensibles, estas se forman cuando los materiales se frotan entre sí o cuando la corriente eléctrica circula a través de materiales de baja conductividad [30].

Este tipo de aislamiento se logra mediante el uso de materiales conductores que absorben y dispersan las cargas electrostáticas, evitando que se acumulen en las superficies. Además, se pueden emplear tomas de tierra

y revestimientos antiestáticos en instalaciones eléctricas para evitar que estas cargas acumuladas causen descargas no controladas [31].

El aislamiento electrostático es particularmente relevante en entornos donde se maneja equipos electrónicos sensibles, como en laboratorios, centros de control, o instalaciones donde los materiales plásticos generan cargas estáticas que podrían interferir con el funcionamiento adecuado de los sistemas. Algunos métodos empleados son:

- * Conexión a Tierra
- * Revestimientos Antiestáticos
- * Sistemas de ionización
- * Materiales discipativos
- * Humedad controlada

– **Conexión a Tierra**

Una de las técnicas más efectivas para evitar la acumulación de cargas electrostáticas es conectar los sistemas a tierra, esto permite que las cargas acumuladas se disipen en el suelo, eliminando el riesgo de descargas. Los conductores a tierra se emplean en todos los sistemas eléctricos, desde los más pequeños circuitos hasta grandes instalaciones industriales convirtiendo esto en una práctica estándar para proteger tanto a las personas como a los equipos sensibles a las descargas estáticas [32].

1.1.11 Métodos de Protección contra Campos Eléctricos Intensos

• **Jaula de Faraday**

Origen, Desarrollo y Funcionamiento

Inventada por Michael Faraday en 1836, es un concepto clave en física y ingeniería eléctrica. Faraday demostró que un conductor cerrado, como una caja metálica, bloquea la influencia de campos eléctricos externos, ya que las cargas eléctricas se redistribuyen en la superficie externa del conductor, generando un campo eléctrico nulo en su interior [7]. Este descubrimiento revolucionó la comprensión del electromagnetismo y tiene aplicaciones cruciales en la protección de dispositivos electrónicos y sistemas eléctricos contra EMI y ESD.

El principio de funcionamiento de la Jaula de Faraday se basa en la redistribución de las cargas libres dentro del conductor cuando se expone a un campo eléctrico. Las cargas negativas se desplazan hacia la parte del conductor más cercana al campo, y las positivas hacia el lado opuesto, creando un campo interno que anula el campo externo. Como resultado, el espacio dentro de la jaula queda libre de campo eléctrico, protegiendo cualquier equipo en su interior [7].

Este fenómeno tiene aplicaciones prácticas en la industria y la transmisión eléctrica, donde la Jaula de Faraday se utiliza para proteger equipos sensibles de interferencias electromagnéticas y descargas electrostáticas, lo que mejora la fiabilidad operativa y la seguridad de los sistemas eléctricos [7].

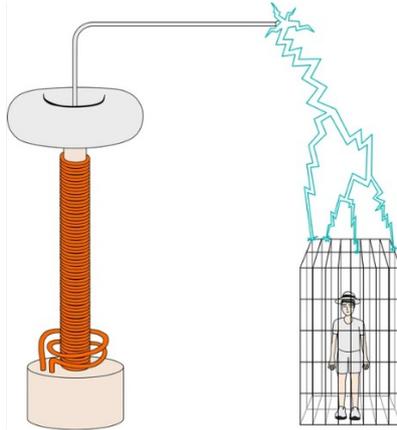


Figura 1.5: Jaula de Faraday

- **Equipo de Protección Personal para Alta Tensión**

El EPP es indispensable para reducir los riesgos al mínimo cuando se trabaja en entornos de alta tensión. Los equipos más comunes incluyen:

- **Guantes dieléctricos:** Los guantes dieléctricos son equipos de protección personal (EPP) esenciales para trabajos con electricidad, diseñados específicamente para proteger al usuario de descargas eléctricas. Están fabricados con goma o caucho especial de alta resistencia, que ofrece propiedades aislantes para prevenir el paso de corriente eléctrica a través del cuerpo.

Existen diferentes tipos y niveles de guantes dieléctricos, clasificados en función del voltaje máximo de protección que ofrecen. Esta clasificación se realiza según las normativas internacionales, como las establecidas por la IEC 60903, y cada tipo de guante debe someterse a pruebas periódicas de aislamiento para asegurar su efectividad. En este caso los niveles instaurados por la norma son:

Tabla 1.5: Designación de la tensión de CA de uso máximo [33]

Clase	CA (V rms)
00	500
0	1 000
1	7 500
2	17 000
3	26 500
4	36 000

La norma nos especifica que el voltaje de uso máximo es la clasificación de voltaje de CA (rms) del equipo de protección que designa el voltaje nominal máximo del sistema energizado que se puede trabajar de forma segura. El voltaje nominal es igual al voltaje de fase a fase en los circuitos multifásicos. En los circuitos monofásicos, el voltaje nominal es igual al voltaje de fase a tierra [33].

Tabla 1.6: Designación de la tensión de CC de uso máximo [33]

Clase	DC (V)
00	750
0	1 500
1	11 250
2	25 500
3	39 750
4	54 000

El voltaje máximo de uso es la clasificación de voltaje de CC del equipo de protección que designa el voltaje nominal máximo del sistema energizado que se puede trabajar de forma segura [33].

- **Botas aislantes:** Las botas dieléctricas están diseñadas para proporcionar una barrera protectora que impide el paso de la corriente eléctrica a través del cuerpo en caso de contacto accidental con una fuente energizada. Están fabricadas con materiales altamente aislantes, como goma o caucho, que evitan la conducción de electricidad, protegiendo al usuario en entornos de alto riesgo eléctrico.

Existen diferentes niveles de clasificación para las botas dieléctricas, que varían según el nivel de tensión al que pueden ofrecer protección. Aunque no existe una normativa específica en Ecuador para la clasificación de las botas dieléctricas, se suele utilizar como referencia la norma europea UNE-EN 50321. Estas normas definen los niveles de protección que van desde los 500 V hasta los 36.000 V [34].

- **Orejeras con protección auditiva:** Las orejeras de protección auditiva están diseñadas para reducir la exposición al ruido intenso generado en entornos de alta tensión, como el producido por el arco eléctrico. Funcionan mediante almohadillas de sellado y materiales aislantes que atenúan el sonido, minimizando el impacto del ruido en el sistema auditivo del usuario. Su uso es fundamental en laboratorios de alta tensión donde se realizan muestreos prolongados, garantizando la seguridad y comodidad del personal expuesto a niveles de ruido elevados [35].

- **Cascos de protección:** Los cascos dieléctricos están diseñados para proteger la cabeza del trabajador no solo de impactos físicos, sino también de posibles descargas eléctricas. Están hechos de materiales no conductores, como termoplásticos de alta resistencia o resinas sintéticas, que impiden la conducción de electricidad, garantizando la seguridad del usuario cuando trabaja en entornos con riesgo eléctrico.

En cuanto a su clasificación, los cascos dieléctricos se categorizan según su capacidad para resistir tensiones eléctricas específicas. A nivel internacional, se hace referencia a normativas como la UNE-EN 50365 en Europa, que cubre la protección de la cabeza en trabajos en instalaciones de baja tensión, o la ANSI/ISEA Z89.1 en Estados Unidos, que clasifica los cascos dieléctricos en:

- * **Clase G (General):** Para proteger contra impactos y contactos con baja tensión, hasta 2200 V [36].

- * **Clase E (Dieléctrico):** Para proteger contra impactos y contactos con alta tensión, hasta 20,000 V, siendo este el tipo más comúnmente utilizado en trabajos eléctricos [36].

1.1.12 Normativas y Estándares

- IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing [20]
- IEEE Guide for Shielding and Grounding of Power Transmission Lines [37]
- IEC "Recommendations for voltage measurement by means of sphere-gaps [38]
- IEC 61000 - Electromagnetic Compatibility (EMC) [39]
- IEC "EPP - Live working - Electrical insulating gloves" [33]
- UNE-EN "EPP - Equipos de protección personal. Calzado conductor para trabajos en alta tensión" [34]
- ANSI "EPP - Industrial Head Protection" [36]

1.2 LA ONDA

1.2.1 Introducción

El universo en su esencia está constituido por ondas; todo movimiento, acción o fenómeno puede explicarse a través de ellas. Las ondas son el mecanismo fundamental mediante el cual la energía se propaga en diferentes formas y medios. Desde el sonido, que se transmite como una vibración en el aire, hasta la electricidad, que fluye a través de oscilaciones en campos electromagnéticos, las ondas son el puente que conecta y mueve la energía en nuestro entorno.

En este capítulo, se exploran los conceptos esenciales de las ondas, abordándolas no como entidades independientes, sino como expresiones del movimiento del medio que adoptan una forma ondulatoria. Se analiza cómo una perturbación inicial genera oscilaciones que se propagan a través del medio, transportando energía sin desplazamientos permanentes de las partículas involucradas. Este enfoque nos permite comprender cómo las ondas, en sus diversas manifestaciones, constituyen la base de fenómenos tan variados como el sonido, la luz y la electricidad, reafirmando que el mundo, en su núcleo, es una interacción constante de vibraciones y energías en movimiento.

1.2.2 Antecedentes

El estudio y la visualización de ondas acústicas han sido objeto de investigación durante más de tres siglos, lo que ha llevado al desarrollo de múltiples técnicas para su detección y análisis. Entre las metodologías más utilizadas se encuentran los arreglos de micrófonos, que permiten la reconstrucción del campo acústico a partir de la detección de la presión sonora en múltiples puntos [40]. Además, los métodos ópticos como la técnica Schlieren y el método de Shadowgraphy aprovechan la interacción entre el sonido y la luz para capturar variaciones en el índice de refracción del medio [41]. También destacan los sistemas interferométricos como el Vibrómetro Láser Doppler (LDV) y la Interferometría de Retroalimentación Óptica (OFI), que proporcionan mediciones precisas sin contacto directo con la onda sonora.

La Interferometría de Retroalimentación Óptica ha cobrado especial relevancia en los últimos años debido a su capacidad para medir ondas acústicas sin necesidad de contacto físico con el medio. Esta técnica se basa en la modulación de la retroalimentación óptica en un láser, donde las variaciones en el índice de refracción del medio, inducidas por las ondas acústicas, afectan las características del láser, permitiendo la detección con alta precisión. Investigaciones recientes han demostrado que la OFI es una alternativa prometedora para la detección optoacústica y la visualización de ondas ultrasónicas en aplicaciones médicas, industriales y científicas [42].

En su tesis doctoral, Urgiles Ortiz [43] desarrolló un sistema de visualización basado en interferometría óptica que permite detectar y medir campos acústicos con alta precisión. El sistema utiliza una cavidad óptica generada por un láser de retroalimentación para medir las variaciones en el índice de refracción provocadas por las ondas acústicas, generando imágenes en 2D y 3D de la propagación de las ondas en el espacio (aire). Este sistema de interferometría óptica permite obtener imágenes tridimensionales utilizando tomografía acústica, al tratar con imágenes en dos dimensiones lo que se realiza es un mapeo bidimensional, ambos de gran relevancia para el entendimiento de como se mueven las ondas a causa de distintos fenómenos en este caso por efecto acústico. En este trabajo también se incluyeron estudios avanzados sobre la radiación acústica y la estimación de patrones de propagación de las ondas. Estos avances permiten mejorar la visualización de ondas en tres y dos dimensiones, lo que resulta clave para el entendimiento del tema.

1.2.3 Concepto de la Onda

La onda, en términos físicos, no debe ser considerada como una entidad independiente, sino como el resultado del movimiento del medio que adopta una forma ondulatoria. Se define como una perturbación que se propaga a través de un medio, transportando energía sin que las partículas del medio experimenten un desplazamiento permanente.

Las ondas son fundamentales en la transmisión de energía en diversas formas,

actuando como el mecanismo a través del cual se difunde la energía a través de diferentes medios. Cuando una partícula del medio se excita, induce un movimiento en las partículas adyacentes, creando una serie de perturbaciones que se desplazan a lo largo del medio. En este sentido, toda la materia puede ser considerada como un conjunto de ondas interconectadas, donde cada oscilación contribuye a la transmisión de energía en la estructura del medio.



Figura 1.6: Ondas en el Agua [44]

1.2.4 Comportamiento de la onda

Su comportamiento se describe matemáticamente mediante funciones sinusoidales, ya que estas representan la variación periódica característica de las ondas. Al depender del tiempo y la posición, estas funciones permiten modelar tanto la evolución temporal de la onda como su propagación en el espacio, describiendo adecuadamente fenómenos como la interferencia y la superposición de ondas [45].

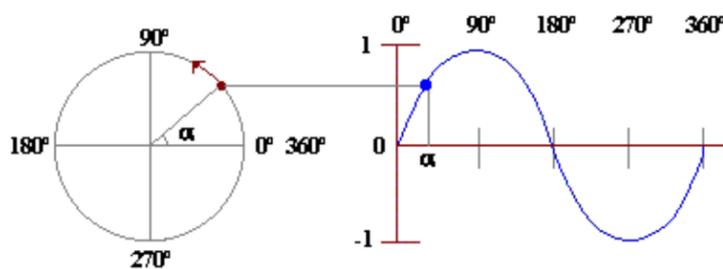


Figura 1.7: Representación Matemática y Gráfica de una Onda Armónica

Inicialmente, una función en dominio del tiempo no representa la propagación de la onda sino una oscilación local en un punto fijo del espacio, dada por la expresión:

$$f(t) = A \sin(\omega t), \quad (1.15)$$

donde A es la amplitud, $\omega = 2\pi f$ es la frecuencia angular y t el tiempo. Sin embargo, para describir su avance primero se ajusta un desfase en la ecuación lo que nos permite desplazar (adelantar - atrasar) a la señal:

$$f(t) = A \sin(\omega t + \varphi), \quad (1.16)$$

donde φ es la fase inicial de la onda, para luego extender la ecuación al famoso espacio - tiempo en donde se introduce la dependencia espacial mediante el número de onda k , definido como

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (1.17)$$

donde λ es la longitud de onda. Así, la función de onda en una dimensión se expresa como

$$f(x, t) = A \sin(\omega t - kx + \varphi), \quad (1.18)$$

donde x es la posición en el espacio, esta ecuación indica que la onda no solo oscila en el tiempo, sino que también se desplaza en el medio con una velocidad dada por $v = \frac{\omega}{k}$.

En un sistema bidimensional, la onda se extiende en múltiples direcciones espaciales, lo que requiere incluir las componentes del número de onda en cada dirección. La ecuación de onda en dos dimensiones se expresa como

$$f(x, y, t) = A \sin(\omega t - k_x x - k_y y + \varphi), \quad (1.19)$$

donde k_x y k_y representan las componentes del vector de onda en las direcciones x y y , respectivamente.

1.2.5 Ondas Ultrasónicas: Fundamento, Generación y Propiedades

Las ondas ultrasónicas son vibraciones mecánicas que se propagan a través de medios materiales a frecuencias superiores a 20 kHz, el límite superior de audición humana. Estas ondas han sido ampliamente estudiadas y aplicadas en diversos campos de la ciencia y la ingeniería debido a sus propiedades únicas de propagación y su capacidad para interactuar con materiales sin dañarlos. En el ámbito de la ingeniería, las ondas ultrasónicas se emplean en aplicaciones que van desde la inspección de materiales y la detección de defectos hasta el monitoreo de procesos industriales y la imagenología médica.

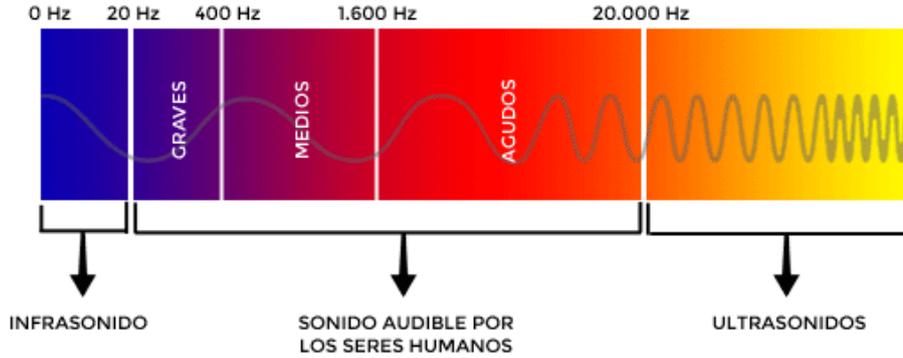


Figura 1.8: Espectro Audible

La generación de ondas ultrasónicas se lleva a cabo mediante transductores que convierten energía eléctrica en energía mecánica. Los transductores pueden ser piezoeléctricos, que utilizan materiales que generan una carga eléctrica al ser sometidos a tensión mecánica.

Transductores Piezoeléctricos: Estos dispositivos son los más comunes y funcionan mediante el efecto piezoeléctrico. Al aplicar un voltaje a un material piezoeléctrico, se deforma y genera ondas ultrasónicas. La elección del material y su configuración afecta la eficiencia y el rango de frecuencia del transductor [46].

Transductores Electromagnéticos: Utilizan principios electromagnéticos para generar ondas ultrasónicas. Aunque son menos comunes que los piezoeléctricos, se emplean en aplicaciones específicas donde se requiere un control preciso de la frecuencia [47].

1.2.6 Propagación y Características Físicas

- **Velocidad de Propagación:** La velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas, denotada como v , varía de acuerdo con el medio en el que se mueven y depende de las propiedades elásticas y de densidad del material. La ecuación general para la velocidad de propagación en un medio se expresa como:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1.20)$$

donde:

- E es el módulo elástico del medio (como el módulo de Young en sólidos),
- ρ es la densidad del medio.

- **Longitud de Onda y Frecuencia:** La relación entre la longitud de onda (λ), frecuencia (f) y velocidad de propagación (v) está dada por la ecuación:

$$v = f \lambda \quad (1.21)$$

Esta relación implica que un aumento en la frecuencia resulta en una disminución de la longitud de onda, haciendo que las ondas ultrasónicas de alta frecuencia sean ideales para aplicaciones que requieren alta resolución, como en imagenología y detección de defectos en materiales [48]. La frecuencia determina la profundidad de penetración y la precisión del ultrasonido: frecuencias más altas producen longitudes de onda más cortas y ofrecen mayor resolución en los materiales analizados.

1.2.7 Modos de Propagación y Atenuación

Las ondas ultrasónicas pueden propagarse en diferentes modos, entre los que destacan los modos longitudinal y transversal, y que dependen de la dirección de vibración de las partículas del medio con respecto a la dirección de la onda:

- En el modo **longitudinal**, las partículas vibran en la misma dirección que la onda. Este tipo de propagación es común en líquidos y sólidos y se utiliza en diversas aplicaciones industriales debido a su mayor velocidad en estos medios [49].
- En el modo **transversal**, las partículas vibran perpendicularmente a la dirección de la onda. Este modo es más común en sólidos, y su velocidad de propagación es generalmente menor que en el modo longitudinal [49].
- En el modo **Rayleigh**, las partículas siguen trayectorias elípticas en la superficie de los sólidos, combinando componentes longitudinales y transversales. Estas ondas se atenúan rápidamente con la profundidad y se utilizan en la inspección de materiales superficiales [49].

Atenuación y Absorción

La atenuación es la pérdida de energía que experimentan las ondas ultrasónicas a medida que viajan por el medio. Se debe principalmente a dos factores: absorción y dispersión. La absorción ocurre cuando la energía de la onda se convierte en calor dentro del medio, mientras que la dispersión se produce debido a imperfecciones en el material, lo que hace que la onda se desvíe de su trayectoria [50].

La ecuación que describe la atenuación de una onda ultrasónica en función de la distancia recorrida x es:

$$A(x) = A_0 e^{-\alpha x} \quad (1.22)$$

donde:

- $A(x)$ es la amplitud de la onda en la distancia x ,
- A_0 es la amplitud inicial,
- α es el coeficiente de atenuación, dependiente de la frecuencia y propiedades del medio.

La atenuación de las ondas ultrasónicas aumenta con la frecuencia, lo que limita su alcance en materiales densos o con alta dispersión [51]. En aplicaciones prácticas, se ajustan la frecuencia e intensidad de la onda según el tipo y espesor del material para reducir la pérdida de señal.

Las ondas ultrasónicas interactúan con los materiales según su densidad, estructura y composición. Al encontrarse con discontinuidades, parte de la energía se refleja y otra continúa su trayecto. Estas reflexiones se utilizan para identificar defectos y evaluar la calidad de los materiales en técnicas de inspección no destructiva [51].

Cono de propagación

Las ondas ultrasónicas generadas por el transductor se propagan con un patrón direccional en forma de cono, donde la mayor intensidad se concentra en el eje central. Aunque su propagación natural sería esférica, la estructura del transductor restringe y curva su salida, limitando su expansión y definiendo su direccionalidad. La apertura efectiva del transductor y la longitud de onda de la señal emitida influyen en la forma de este cono de propagación.

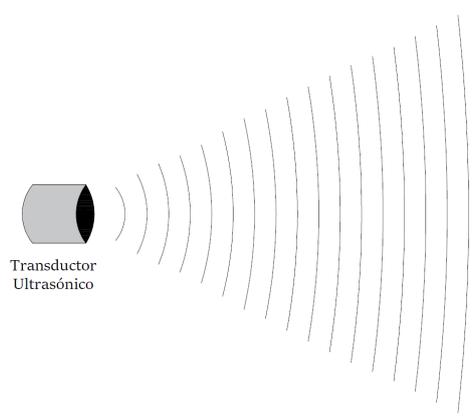


Figura 1.9: Cono de propagación

En la siguiente imagen, representada en el dominio del espacio, se observa cómo la energía de la onda se dispersa y atenúa con la distancia. Este fenómeno es fundamental en el experimento, ya que permite analizar la interacción entre las ondas ultrasónicas y el campo eléctrico aplicado. Además, resulta particularmente interesante que en este estudio se utilice una onda electromagnética para detectar una onda mecánica, lo que permite registrar con precisión las variaciones en su propagación y evaluar los efectos inducidos por los campos eléctricos intensos.

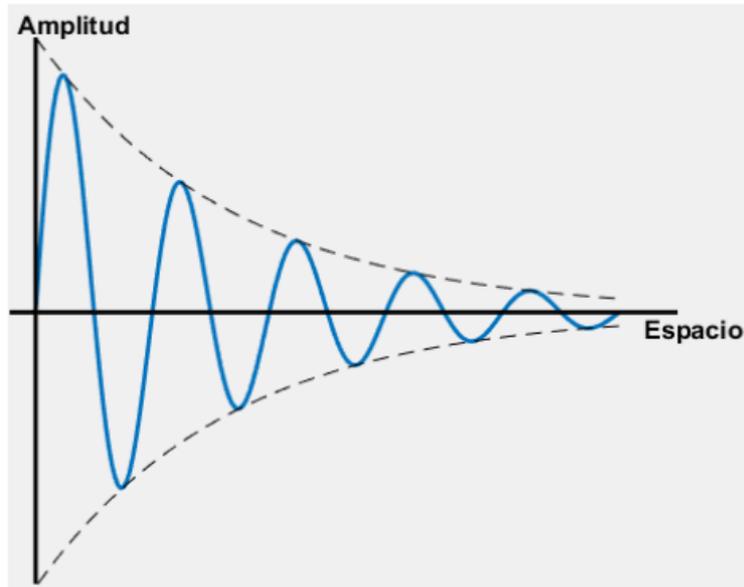


Figura 1.10: Dispersión y Atenuación de la Onda Sonora

1.2.8 Visualización del Campo Sonoro

Entender los fenómenos físicos ha sido un desafío que los investigadores buscan superar a través del diseño e implementación de sensores capaces de capturar información precisa mediante la variación de parámetros físicos observables. La recolección, procesamiento y representación de estos cambios ha facilitado una mayor comprensión de los fenómenos en estudio. A lo largo de la historia, se han desarrollado diversas herramientas de visualización, como la fotografía desde 1880, que transformó nuestra manera de percibir el mundo y a nosotros mismos al registrar lo que antes era invisible [43].

Durante más de tres siglos, se han desarrollado diferentes técnicas para la visualización del sonido. Los científicos han trabajado para convertir este fenómeno audible en una imagen que permita una mejor comprensión de la propagación de las ondas sonoras [43].

Entre las metodologías más utilizadas se encuentran los arreglos de micrófonos, que permiten la reconstrucción del campo acústico a partir de la detección de la presión sonora en múltiples puntos; los métodos ópticos como la técnica Schlieren y el método de Shadowgraphy, que aprovechan la interacción entre el sonido y la luz para capturar variaciones en el índice de refracción del medio; y los sistemas interferométricos como el LDV y la OFI, que proporcionan una medición precisa del campo acústico sin contacto directo con la onda sonora [43].

1.2.9 Teoría de la interferometría de retroalimentación óptica para detección optoacústica

La OFI depende principalmente de un solo componente, que usualmente es un láser semiconductor. Debido a esto, el fenómeno interferométrico está fuertemente relacionado con las propiedades físicas del láser[43]. En este contexto, la *configuración experimental para la obtención de imágenes de ondas de presión acústica* se desarrolla mediante el uso de interferometría de retroalimentación óptica, lo cual permite obtener imágenes precisas de las ondas acústicas generadas. Este enfoque experimental es esencial para visualizar las fluctuaciones acústicas de los medios y se basa en la interacción del pulso láser con las ondas acústicas, generando un patrón interferométrico que es analizado para obtener imágenes detalladas de las ondas de presión.

Diseño de la configuración de interferometría de retroalimentación óptica acústica para un punto.

El principio básico para generar imágenes de la onda de presión acústica consiste en su propagación entre la fuente láser y el reflector que constituye la cavidad externa. En condiciones óptimas, la onda de presión viaja de manera perpendicular al eje de la luz, y la fuente acústica se ubica equidistante tanto del láser como del reflector [43]. A continuación, se presenta una representación tomográfica, que trabaja con los tres ejes (X, Y, Z), permitiendo la reconstrucción de un volumen completo.

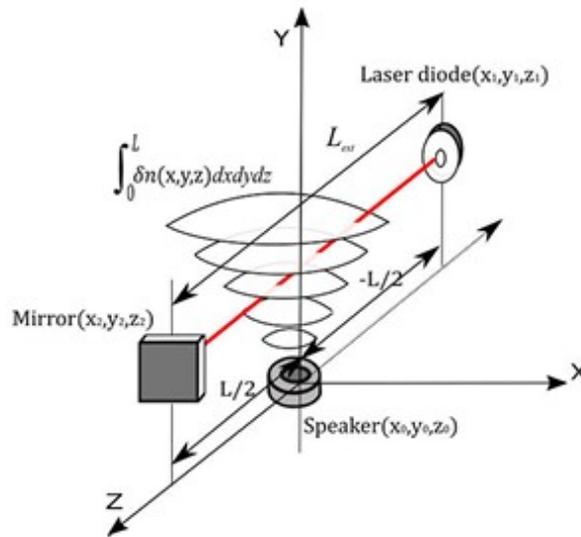


Figura 1.11: Diseño de la configuración acústica mediante interferometría de retroalimentación óptica basada en tomografía [43]

El interferómetro de retroalimentación óptica utiliza un diodo láser L1320P5DFB monomodo ($\lambda = 1310$ nm), cuyo haz es colimado mediante una lente Thorlabs C240TME-C y reflejado por un espejo de aluminio Thorlabs PF10-03-F01 (25,4 mm de diámetro). La cavidad externa, de 200 mm, está montada sobre platinas de

traslación micrométrica con soportes optomecánicos, permitiendo el ajuste angular del espejo en dos grados de libertad para una alineación precisa [43].

El sistema incorpora un transmisor piezoeléctrico ultrasónico (KPUS-40T16T-K768) de 12 mm de diámetro, alimentado por una señal sinusoidal de 10 Vpp a 40 kHz generada externamente, con una potencia acústica estimada de 117 dB, aunque sin verificación experimental. La gestión electrónica incluye un controlador láser de corriente ajustable, un amplificador de transimpedancia de 100 dBV/A para detectar variaciones de corriente en el fotodiodo del láser y una tarjeta de adquisición de datos National Instruments de 16 bits, operando a 1 MS/s [43].

A continuación, se presenta una representación del mapeo bidimensional, donde se realiza la adquisición de datos empleando solo los ejes X e Y, generando una imagen en un plano sin información volumétrica.

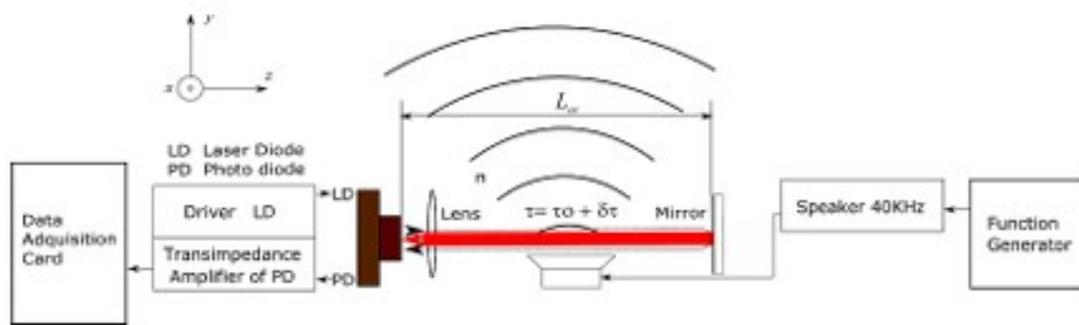


Figura 1.12: Diseño de un sistema de interferometría con retroalimentación óptica acústica [43]

Producción de imágenes de ondas de presión acústica

Para capturar una imagen de este campo, o incluso una secuencia que muestre su propagación, es necesario registrar varias señales en diversas posiciones y a distintas distancias de la fuente acústica. Esto genera naturalmente un desfase temporal que varía según la ubicación en el espacio, por lo que es crucial sincronizar la adquisición con la señal de excitación para corregir este efecto. Hay dos formas de mover el punto de medición: desplazando la fuente de sonido o moviendo tanto el láser como el reflector. Si bien la primera opción suele ser más práctica en entornos de laboratorio, resulta complicada en aplicaciones del mundo real. Por esta razón, optamos por mover el sensor, es decir, el reflector y el láser, en este estudio [43].

El diodo láser bajo retroalimentación óptica El modelo esquemático de un láser con retroalimentación óptica se muestra en la figura a continuación, en donde se aprecia como la luz emitida desde la cara frontal del láser se refleja (o retrodispersa) desde un espejo externo (o superficie de dispersión) y vuelve a ingresar a la cavidad del láser con su cambio de fase inducido [43].

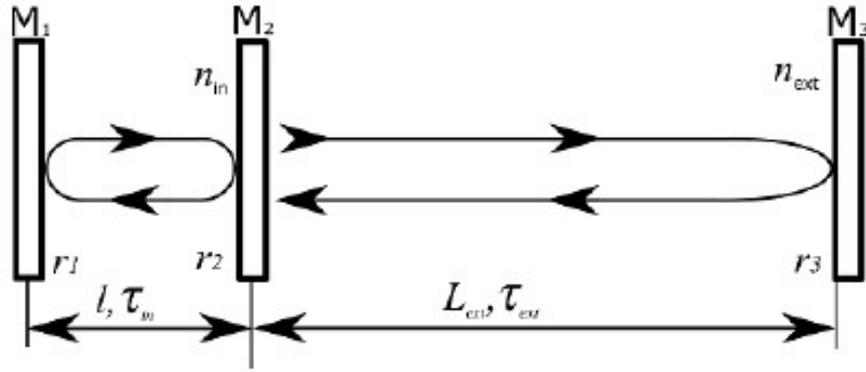


Figura 1.13: Diagrama del modelo de tres espejos [43]

1.2.10 Tiempo de vuelo

Bajo criterio de Urgiles [43], el concepto de tiempo de vuelo o TOF se refiere al intervalo requerido por un pulso láser para recorrer una determinada distancia hasta un objeto reflectante y regresar al punto de origen. La relación entre el tiempo de vuelo y la distancia recorrida depende no solo de la longitud de la cavidad de propagación, sino también de las propiedades del medio en el que el pulso viaja. En sistemas ópticos y acústicos, esta variable es crítica para determinar con precisión distancias o para caracterizar las propiedades del medio.

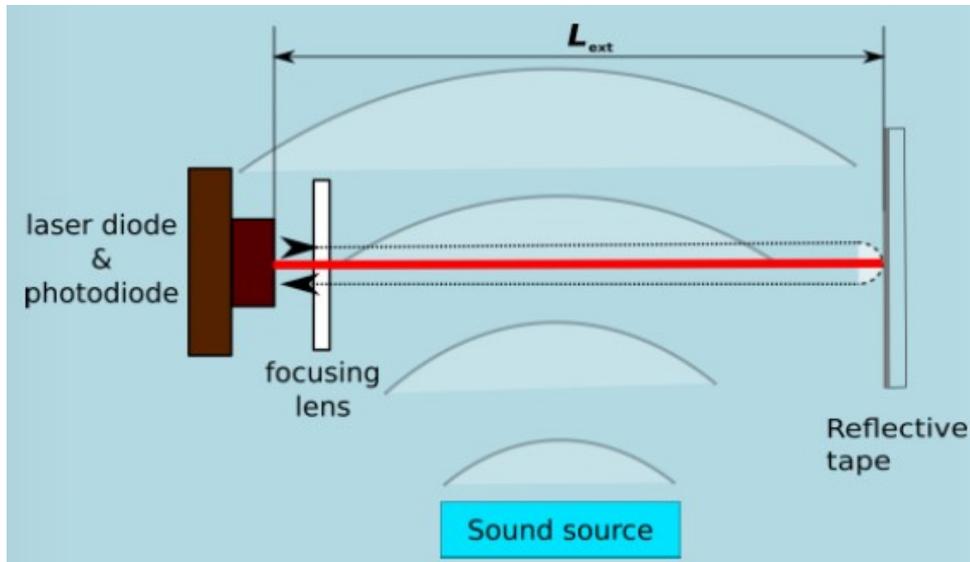


Figura 1.14: Esquema de detección acústica con principio OFI [43]

Cuando la cavidad a través de la cual se desplaza el pulso es pequeña, el tiempo de vuelo (τ_{ext}) se reduce, lo que mejora la resolución y minimiza las distorsiones. Sin embargo, las vibraciones del objeto reflectante o fluctuaciones en el medio provocan variaciones en la distancia, modulando el tiempo de vuelo y afectando la precisión de la medición. Estas variaciones, expresadas como $\delta\tau$, son causadas por cambios

en el índice de refracción n_{ext} debido a factores como la presión o la densidad del medio.

El tiempo de vuelo está determinado por la longitud de la cavidad externa L_{ext} y el índice de refracción n_{ext} , que puede variar según la posición. La variación en el tiempo de vuelo se describe por la ecuación:

$$\delta\tau = 2 \int_0^{L_{\text{ext}}} \frac{\delta n(z)}{c} dz, \quad (1.23)$$

donde:

$\delta\tau$ es la variación en el tiempo de vuelo debido a cambios en el índice de refracción.

L_{ext} es la longitud de la cavidad externa.

$\delta n(z)$ es la variación del índice de refracción a lo largo de la cavidad.

c es la velocidad de la luz en el vacío.

¿Por que es una integral?

El uso de una integral se justifica porque el láser no sigue una trayectoria simple y uniforme. En una cavidad óptica, la onda láser atraviesa múltiples puntos dentro del espacio, y en cada uno de estos puntos puede experimentar un cambio en su velocidad debido a las variaciones en el índice de refracción. La integral tiene el propósito de acumular todos estos pequeños cambios en el tiempo de vuelo, es decir, sumar las contribuciones de cada región del espacio por la que la onda pasa, teniendo en cuenta la interacción tridimensional.

Aunque la onda se propaga en un espacio tridimensional, el láser, al rebotar en los espejos y viajar en una trayectoria recta, parece "atravesar" el espacio en una línea, recogiendo información sobre el índice de refracción en esa dirección. Sin embargo, la integral refleja que la onda está presente en todas las dimensiones mientras se propaga. Esto significa que, aunque el láser sigue una trayectoria directa, la onda abarca más de ese simple trayecto y se distribuye por toda la cavidad, interactuando con el medio a lo largo de su volumen.

Medio de propagación

Es un factor determinante en el comportamiento del tiempo de vuelo, ya que la velocidad de propagación de las ondas varía según las propiedades del medio, como su densidad y compresibilidad. Cuando se trata de ondas acústicas, un aumento en la densidad del medio ocasiona un incremento en la velocidad de propagación, mientras que una disminución de la densidad conduce a una reducción en la velocidad; este efecto se debe a la relación entre la presión aplicada al medio y la compresión o expansión de las partículas que lo componen.

Un claro ejemplo es aplicar una onda ultrasónica de 40 kHz, que en aire tiene una longitud de onda de aproximadamente 0.8 cm. Sin embargo, al introducirse en un medio de mayor densidad, como el agua, la velocidad de propagación aumenta, lo que resulta en una longitud de onda significativamente mayor, manteniendo la misma frecuencia de 40 kHz.

CAPÍTULO 2

MÉTODO EXPERIMENTAL

2.1 Generación del Campo Eléctrico Intenso

Para generar un campo eléctrico intenso, se construirá el circuito de la práctica denominada "Ruptura Dieléctrica", previamente desarrollado en la sección práctica de la asignatura de Alta Tensión de la carrera de Electricidad, tanto en su versión de corriente continua como de corriente alterna. Este circuito permitirá crear una brecha adecuada para implementar el método de interferometría de retroalimentación óptica con fines de detección optoacústica. A continuación, se presentan los esquemas de ruptura dieléctrica en configuraciones de CC y CA.

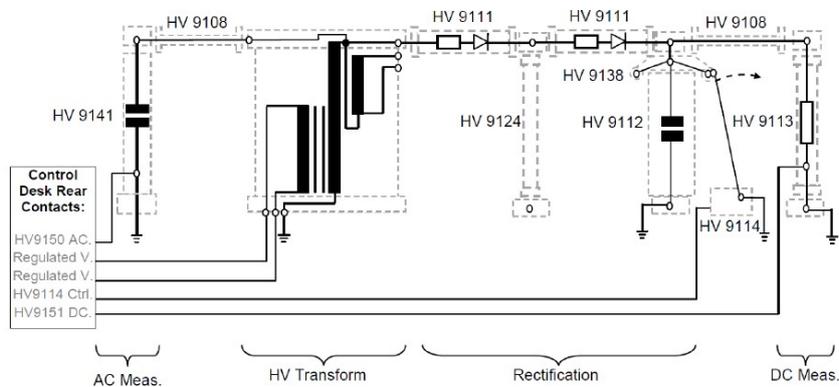


Figura 2.1: Esquema Ruptura Dieléctrica en CC [52]

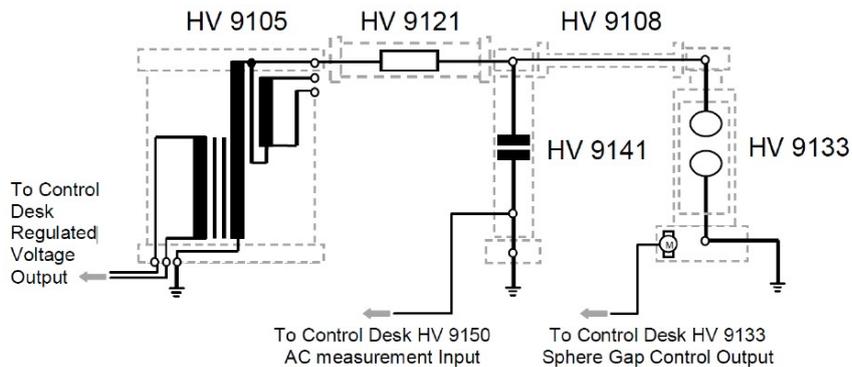


Figura 2.2: Esquema Ruptura Dieléctrica en CA [53]

2.1.1 Equipos y Componentes de Alta Tensión

- **Módulo de entrenamiento para alto voltaje "TERCO HV 9000"**

El módulo de entrenamiento en alto voltaje Terco HV 9000 está basado y constituido por elementos de alta precisión y se lo puede utilizar tanto para los docentes como para la investigación. Los montajes para las diferentes pruebas se las hace fácilmente al no requerir de herramientas especiales y los valores medidos son muy precisos e incluso se los puede utilizar para fines de calibración [54].



Figura 2.3: Laboratorio Alta Tensión

- **Módulo de control (HV 9103)**

El módulo de control se utiliza para controlar y operar al equipo de prueba en alta tensión. Contiene diferentes elementos de control y señalización que dan alerta de seguridad en casos de que se produzcan fallas durante la prueba. El módulo de control posee instrumentos de medición, pruebas de impulso y voltímetros, así como también el dispositivo de disparo; lo clave modulo es que posee un variac siendo el cual aumenta o decrementa la tensión de los bobinados del transformador [54].



Figura 2.4: Modulo de control (HV 9103)

- **Transformador de prueba (HV 9105)**

El transformador de prueba está formado por tres arrollamientos, una tapa aislante y una corona inferior de aluminio. El aislante en forma cilíndrica está hecho con resina epoxica y reforzada con fibra de vidrio. La bobina primaria es de doble bobinado a $2 \times 220V$ y conectadas en paralelo. Cuando se conectan los devanados en serie para una alimentación de $440V$, la conexión requiere el 50% de la corriente de conexión en paralelo. El segundo devanado es el devanado de alto voltaje de 100 KV conectado en serie. El tercer devanado conocido como el acoplador de arrollamiento, este facilita las conexiones en cascadas de los transformadores. El bobinado está impregnado y asilado con aceite para transformadores de alta calidad [54].



Figura 2.5: Transformador de prueba (HV 9105)

- **Voltímetro pico digital (HV 9150)**

El voltímetro pico digital es un instrumento de medición diseñado para capturar y mostrar con precisión los valores de voltaje pico en sistemas de corriente alterna y continua. Este dispositivo se caracteriza por su alta sensibilidad y capacidad de respuesta rápida, lo que permite medir variaciones de voltaje en tiempo real. Su interfaz digital facilita la lectura de resultados, mientras que su construcción robusta asegura un rendimiento fiable en condiciones de operación exigentes. Es una herramienta indispensable en aplicaciones de prueba, mantenimiento y análisis de sistemas eléctricos [54].



Figura 2.6: Voltímetro pico digital (HV 9150)

- **Capacitor de medida (HV 9141)**

Es un dispositivo diseñado específicamente para la medición precisa de voltajes en sistemas de corriente alterna de alta tensión. Se caracteriza por su alta estabilidad y capacidad de soportar tensiones elevadas, lo que lo convierte en una herramienta esencial en aplicaciones de prueba y monitoreo eléctrico. Su construcción robusta y el uso de materiales de alta calidad garantizan un rendimiento confiable, permitiendo realizar mediciones con exactitud y seguridad en entornos exigentes [54].



Figura 2.7: Capacitor de medida (HV 9141)

- **Barra para conexión de aluminio (HV 9108)**

Es un componente crucial en laboratorios de alta tensión, diseñada para interconectar diversos elementos eléctricos de manera segura y eficiente. Su

construcción en aluminio proporciona una combinación óptima de ligereza y alta conductividad eléctrica, lo que minimiza las pérdidas de energía durante la transmisión de corriente. Además, su resistencia a la corrosión garantiza una larga vida útil y fiabilidad en entornos exigentes. Este tipo de barra facilita la organización y simplificación de las conexiones, permitiendo configuraciones flexibles y seguras en experimentos y pruebas eléctricas de alta tensión [54].



Figura 2.8: Barra para conexión de aluminio (HV 9108)

- **Copa Y Base de conexión de aluminio (HV 9109; HV 9110)**

Son elementos conductivos hechos de aluminio enfocados a la conexión entre componentes, siendo soportes que encajan a la perfección con los extremos de cada elemento, con un diseño que permite la conexión de 4 barras en posición horizontal; la copa permite 2 en posición vertical y la base solo 1 [54].



Figura 2.9: Copa Y Base de conexión de aluminio (HV 9109; HV 9110)

- **Resistor de carga (HV 9121)**

El resistor de carga es un componente crucial en sistemas de alta tensión, diseñado para disipar la energía eléctrica de manera controlada y proteger los equipos, como transformadores, ante posibles fallas. En este caso, el resistor tiene una resistencia de $10\text{ M}\Omega$ y una capacidad nominal de 140 kV . Su función principal es absorber y disipar la energía en situaciones de prueba o cuando se presentan condiciones anormales, evitando así sobrecargas que podrían dañar el transformador o afectar la operación del circuito [54].



Figura 2.10: Resistor de carga (HV 9121)

- **Rectificador (HV 9111)**

El rectificador de silicio es un dispositivo semiconductor diseñado para convertir CA en CC, empleando un material de silicio como elemento activo debido a su alta eficiencia y durabilidad. Este rectificador opera con una resistencia de protección de $100\text{ k}\Omega$, la cual actúa para limitar la corriente en caso de sobrecargas, protegiendo el componente de posibles fallos. Tiene un rango de corriente de 20 mA y un voltaje pico inverso de 140 kV , lo que lo hace adecuado para aplicaciones de alta tensión, asegurando que no se produzcan daños durante los picos de voltaje en la inversión de la polaridad [54].



Figura 2.11: Rectificador (HV 9111)

- **Condensador de impulso (HV 9112)**

El condensador de impulso está diseñado para generar voltajes tipo choque, comúnmente utilizados en pruebas de alta tensión, o para actuar como amortiguador de impulso en sistemas de CC. Su capacidad de 25 nF le permite almacenar y liberar rápidamente una gran cantidad de energía en forma de pulsos de alta tensión. Con un voltaje de operación en CC y de impulso de hasta 140 kV , este condensador es ideal para aplicaciones que requieren protección contra transitorios eléctricos o para simular condiciones extremas en pruebas de equipos eléctricos, garantizando su estabilidad ante fluctuaciones bruscas de voltaje [54].



Figura 2.12: Condensador de Impulso (HV 9112)

- **Resistor de Medida (HV 9113)**

El resistor de medida está diseñado para la medición de altos voltajes en CC, siendo conectado en serie en el circuito. Con una capacidad de tolerancia de hasta 140 kV , presenta una resistencia nominal de $280\text{ M}\Omega$, lo que minimiza el impacto en el comportamiento del sistema durante la medición. Su corriente continua máxima es de 0.5 mA , garantizando una operación segura y precisa. Este componente es fundamental para la protección de los equipos de medición, así como para la integridad del circuito donde se encuentra implementado [54].



Figura 2.13: Resistor de Medida (HV 9113)

- **Barra Aislante (HV 9124)**

La barra aislante se utiliza para aislar uniones y soportes en sistemas de alta tensión. Puede soportar hasta 100 kV en CA y 140 kV en impulsos CC, proporcionando protección frente a descargas eléctricas y asegurando la separación segura entre elementos conductores [54].



Figura 2.14: Barra Aislante (HV 9124)

- **Pértiga de descarga (HV 9107)**

La pértiga de descarga a tierra está diseñada para la disipación segura de cargas eléctricas residuales en componentes de alta tensión. Con una resistencia de descarga de 100 ohm, permite la transferencia controlada de energía a tierra, reduciendo el riesgo de descargas inesperadas. Su estructura de 2.5 m de longitud y peso de 2.5 kg proporciona un alcance adecuado para su manipulación en entornos eléctricos. Es utilizada en operaciones de mantenimiento y seguridad para la descarga manual de componentes de alta tensión, garantizando la protección del personal y la integridad del sistema [54].



Figura 2.15: Pértiga de descarga (HV 9107)

- **Medidor de distancia entre chispas (HV 9133)** El medidor de brecha con esferas planas, permite la evaluación precisa de voltajes elevados mediante la generación controlada de descargas eléctricas, aunque la norma IEC 1960 fue originalmente establecida para mediciones con electrodos esféricos, sus principios siguen siendo aplicables a otros tipos de configuraciones, como los electrodos planos, debido a que las descargas eléctricas en brechas de aire dependen de factores como la distancia entre los electrodos, la presión atmosférica y la forma del campo eléctrico generado. En este sentido, la norma proporciona directrices fundamentales para la determinación del voltaje de ruptura en función de la separación entre los electrodos y las condiciones ambientales, asegurando mediciones confiables y comparables en pruebas de alta

tensión [38]. Durante la aplicación de voltajes crecientes, se observa el efecto corona, manifestado como un silbido o chisporroteo debido a la ionización del aire alrededor de los electrodos. Si el voltaje continúa aumentando, se produce la ruptura del dieléctrico, dando lugar a un arco eléctrico visible, lo que permite evaluar la capacidad aislante de los materiales y el comportamiento de los equipos eléctricos bajo condiciones de alta tensión [54].



Figura 2.16: Medidor de distancia entre chispas (HV 9133)

Parámetros:

Para la fase experimental en alta tensión, se trabajará con electrodos planos en el medidor de brecha separados a una distancia de 8.3 cm, se tiene una temperatura que rodean entre los 20°C indicando que tendrá un impacto mínimo sobre la ruptura dieléctrica del aire, ya que se encuentra en condiciones normales. La presión atmosférica es de 752.8 hPa lo que podría disminuir ligeramente la capacidad de aislamiento del aire debido a su menor densidad, lo que facilitaría la ruptura dieléctrica a voltajes más bajos. Una humedad relativa del 58% lo que incrementa la conductividad del aire, reduciendo la resistencia dieléctrica y, por lo tanto, también podría facilitar la ruptura a voltajes más bajos en comparación con condiciones más secas.

2.1.2 Seguridad en el laboratorio Terco HV 9000 (Alta Tensión)

La seguridad dentro del modulo de entrenamiento es un aspecto crítico dentro del campus universitario de la carrera de ingeniería eléctrica. Al trabajar con equipos y sistemas que manejan altos niveles de voltaje, es fundamental implementar medidas rigurosas de seguridad para prevenir accidentes, garantizar el bienestar del personal

y evitar daños a los equipos. Los experimentos de alta tensión no solo se limitan a los laboratorios de investigación, sino también a pruebas industriales.

2.1.2.1 Principios Fundamentales de Seguridad en Alta Tensión

El trabajo con alta tensión conlleva riesgos inherentes, tales como electrocución, quemaduras graves, y daños materiales. Por ello, los ingenieros eléctricos deben seguir estrictas normas de seguridad. Los principios básicos incluyen el uso de equipo de protección personal (EPP), el aislamiento adecuado de los circuitos y componentes, y la implementación de procedimientos de bloqueo y etiquetado ("lockout-tagout") conocido como LOTO para asegurar que el sistema esté desenergizado antes de iniciar cualquier trabajo.



Figura 2.17: Indicadores de energización

Como aspirantes a futuros ingenieros eléctricos, es fundamental que siempre tengamos en cuenta las **5 reglas de oro**, que son así denominadas porque representan los principios básicos de seguridad para evitar accidentes y garantizar un entorno de trabajo seguro en instalaciones eléctricas. Estas reglas nos permiten minimizar riesgos y trabajar con responsabilidad.

1. Seccionar o desconectar la instalación
2. Prevenir cualquier posible realimentación
3. Verificar la ausencia de tensión
4. Poner a tierra y en cortocircuito
5. Proteger y señalizar adecuadamente la zona de trabajo.

2.1.2.2 Protocolo de Seguridad

La universidad ha implementado medidas de seguridad rigurosas en su laboratorio eléctrico, incluyendo una malla de puesta a tierra con una resistividad de 0.18Ω ; perfecto considerado que en la norma no debe exceder los 2Ω [20]. Esto garantiza que cualquier descarga eléctrica se dirija a tierra, protegiendo a los usuarios; con la ayuda de un telurómetro tipo pinza nos aseguramos que esté dentro del rango.



Figura 2.18: Medición de resistividad de la malla del Laboratorio de Alta Tensión

Al entrar al módulo de entrenamiento TERCO HV 9000, antes de realizar armados de circuitos de prueba, los estudiantes deben descargar el equipo especialmente el transformador HV 9105 con la pértiga de descargas HV 9107 y esta debe mantenerse anclada hasta culminar la parte de armado para luego energizar el sistema, El suelo del área de armado de circuitos esta constituido por placas de aluminio conectadas a tierra, lo que asegura que cualquier descarga sea desviada de manera inmediata y segura; ademas todo el módulo de entrenamiento está aislada mediante una jaula de Faraday conectada a la misma tierra.

La puerta de acceso cuenta con un sensor de final de carrera al igual que el contrafrente de la chapa de la puerta que impiden energizar el transformador si los sensores no estan activados. Además, luces indicadoras encima de la puerta nos señalan si es seguro ingresar al área de pruebas o no.



Figura 2.19: Sensor final de carrera

El banco de control está diseñado con dos interruptores rotativos para la regulación de la tensión, uno de ajuste rápido y otro de ajuste gradual mediante un Variac ubicado en el compartimento inferior del módulo de control HV 9103, cuya activación requiere un interruptor de dos posiciones y una llave de seguridad para energizar el transformador. El sistema garantiza que la energización del circuito solo sea posible cuando el voltaje del bobinado primario es cero, asegurando así condiciones de operación seguras. Además, incorpora una serie de pulsadores destinados a la activación y desactivación del primer y segundo bobinado del transformador HV 9105, junto con un pulsador de desbloqueo que permite la activación del segundo bobinado cuando el voltaje en el primario no es cero, proporcionando un control seguro y preciso del sistema.



Figura 2.20: Switches generales

2.2 Estructura para Interferometría de Retroalimentación Óptica para Detección Optoacústica

2.2.1 Componentes

- **Diodo Láser**

El sistema incluye un diodo láser L1320P5DFB con emisión monomodo tanto transversal como longitudinal a una longitud de onda de $\lambda = 1310 \text{ nm}$. Este láser emite luz hacia el espejo a través de una lente de colimación (Thorlabs C240TME-C), lo que permite una proyección controlada y precisa del haz.

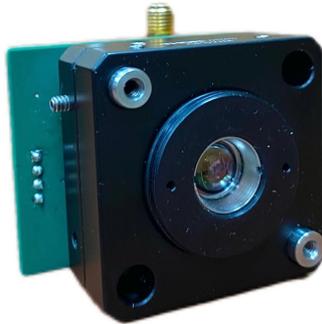


Figura 2.21: Diodo Láser

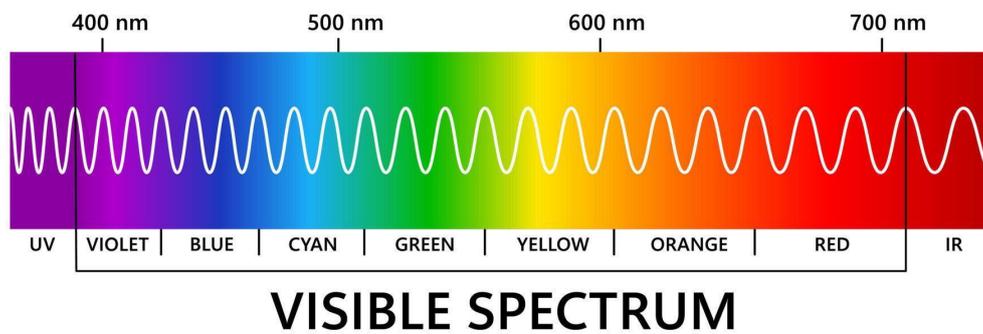


Figura 2.22: Longitud de la Onda de luz

Para determinar la frecuencia de emisión del diodo láser, se utiliza la relación fundamental de la propagación de ondas electromagnéticas en el vacío:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{1310 \times 10^{-9} \text{ m}}. \quad (2.1)$$

Resolviendo, se obtiene:

$$f \approx 2.29 \times 10^{14} \text{ Hz} \approx 229 \text{ THz}. \quad (2.2)$$

Con el objetivo de verificar el correcto funcionamiento del láser en condiciones óptimas, se realizaron una serie de pruebas utilizando un osciloscopio conectado directamente al láser mediante una sonda BNC con salida coaxial, garantizando una transmisión eficiente de la señal sin interferencias significativas. El procedimiento de prueba se estructuró en dos fases:

En la primera fase, el láser fue alineado con precisión para que su haz impactara sobre una superficie plana y cercana. Durante la prueba, el osciloscopio registró una señal sinusoidal estable, lo que indica que la intensidad de emisión del láser presenta una modulación periódica. Esta oscilación puede atribuirse a la dinámica de la cavidad resonante del diodo láser, donde pequeñas variaciones en la densidad de portadores dentro de la región activa generan fluctuaciones en la potencia de salida.

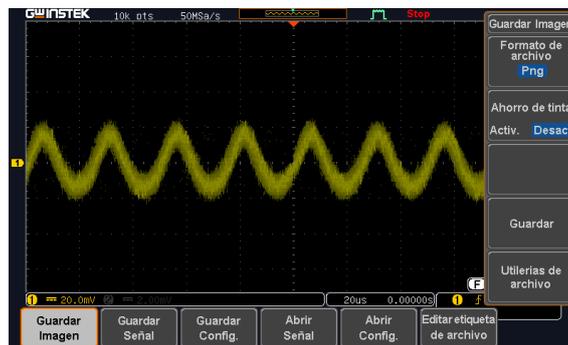


Figura 2.23: Haz del Diodo Láser rebotando

En la segunda fase, se implementó un programa en LabVIEW para registrar en tiempo real los datos obtenidos mientras el haz del láser incidía sobre la superficie. El instante en que el láser permanecía impactando en la superficie era registrado, almacenando los datos en un archivo .xlsx para su posterior análisis. Durante esta etapa, la presencia de ruido en la señal era esperada debido a que el láser no estaba montado en una estructura fija, sino sostenido manualmente, lo que introducía variaciones involuntarias en la alineación del haz y en la lectura de datos. A pesar de estas fluctuaciones, se recopilaron todos los datos obtenidos y se representaron gráficamente, observándose una señal sinusoidal que refleja la modulación en la intensidad de emisión del láser.

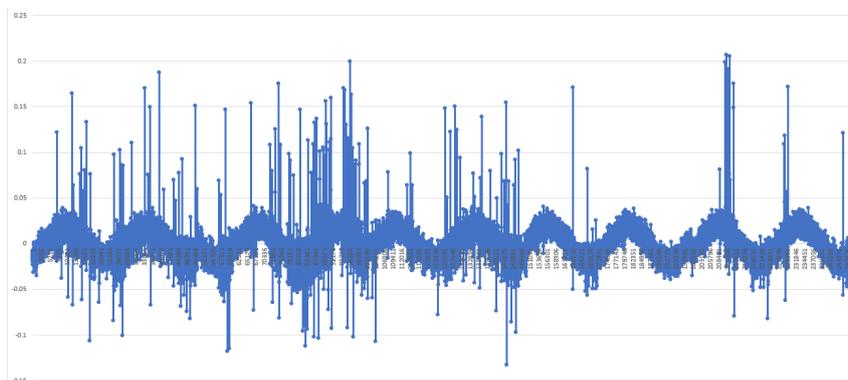


Figura 2.24: Señal Sinusoidal en Excel

- **Espejo**

El espejo utilizado en el sistema es un modelo de aluminio mejorado, de 25.4 mm de diámetro (Thorlabs PF10-03-F01). Este espejo se coloca a una distancia de 200 mm del láser, configurando así la longitud de la cavidad externa L_{ext} . El espejo está montado en soportes optomecánicos ajustables y se puede alinear con precisión mediante dos grados de libertad angular, permitiendo un control preciso sobre el ángulo de incidencia del haz reflejado.



Figura 2.25: Espejo para rebote del Diodo Láser

- **Transductor piezoeléctrico**

La fuente acústica es un transmisor piezoeléctrico ultrasónico (KPUS-40T-16T-K768) de 12 mm de diámetro, en cuanto a la señal de excitación, esta es impulsada por un voltaje sinusoidal de 10 V de amplitud pico a pico a 40 kHz. Esta señal es generada por un generador de funciones y se espera que la potencia acústica alcance los 117 dB según la hoja de datos del fabricante.



Figura 2.26: Transductor Ultrasónico

- **Estructura de soporte**

La estructura que sostiene tanto el láser como el espejo está fabricada en aluminio de espesor 3 mm con el objetivo de reducir el peso total que debe mover el setup cartesiano. Esta pieza tiene una longitud aproximada de 44 cm, en ambos extremos de la estructura, se extienden soportes adicionales de aluminio que aseguran el láser y el espejo, proporcionando así una mayor distancia y aislamiento del campo eléctrico intenso por el cual atravesaran.



Figura 2.27: Estructura para interferometría con retroalimentación óptica para detección acústica

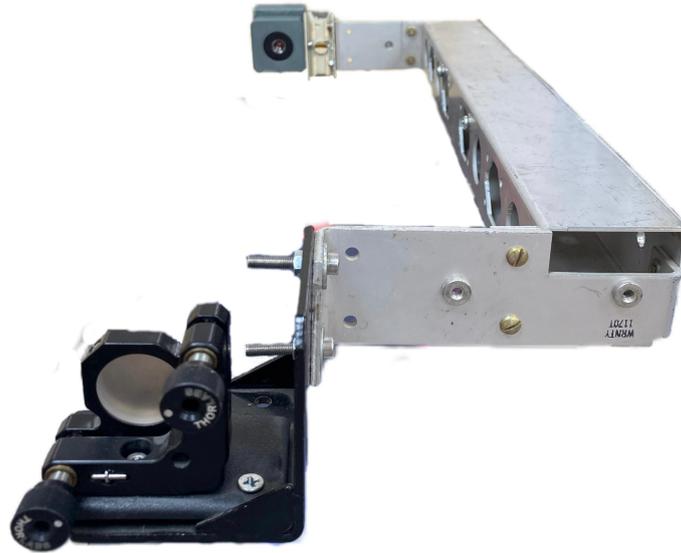


Figura 2.28: Vista lateral de estructura para Interferometria

2.2.2 Calibración

- **Configuración Transductor Ultrasónico**

El procedimiento comenzó con la configuración del generador de funciones, que fue ajustado para suministrar una señal de 40 kHz al transductor ultrasónico. Una vez establecida la señal de excitación, se utilizó un multímetro para verificar la frecuencia de operación del transductor, midiendo en hertzios (Hz). Este paso permitió confirmar que el transductor estaba respondiendo correctamente a la señal aplicada.

Posteriormente, el transductor ultrasónico fue ubicado para que su propagación atravesara la trayectoria del haz láser, alineado perpendicularmente al recorrido del mismo, tal como se muestra en la siguiente figura. Esta disposición experimental permite evaluar las posibles distorsiones en la señal sinusoidal generada, causadas por la interacción entre la onda ultrasónica y el haz láser.

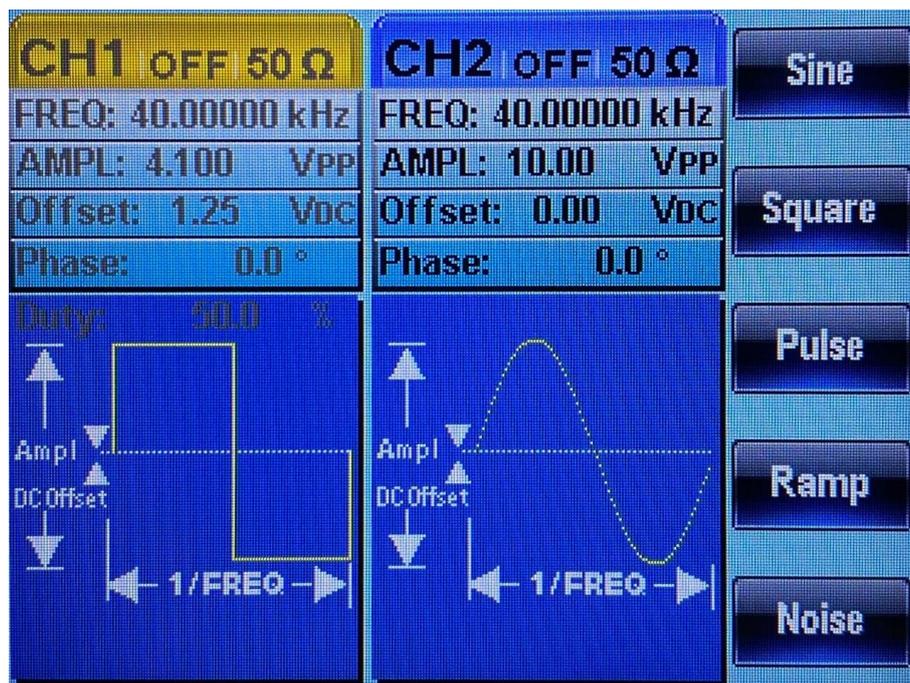


Figura 2.29: Configuración generador de funciones a 40 kHz

Cabe destacar que la ubicación del transductor mostrada en la figura siguiente fue utilizada como posición preliminar durante las pruebas iniciales, debido a su capacidad para proporcionar una visualización adecuada de la señal sinusoidal. No obstante, esta configuración no fue empleada durante los ensayos con alta tensión. En condiciones operativas más exigentes, será necesario reubicar el transductor en una posición que no interfiera con las condiciones normales de operación ni comprometa la integridad del sistema, garantizando así una medición precisa y segura.

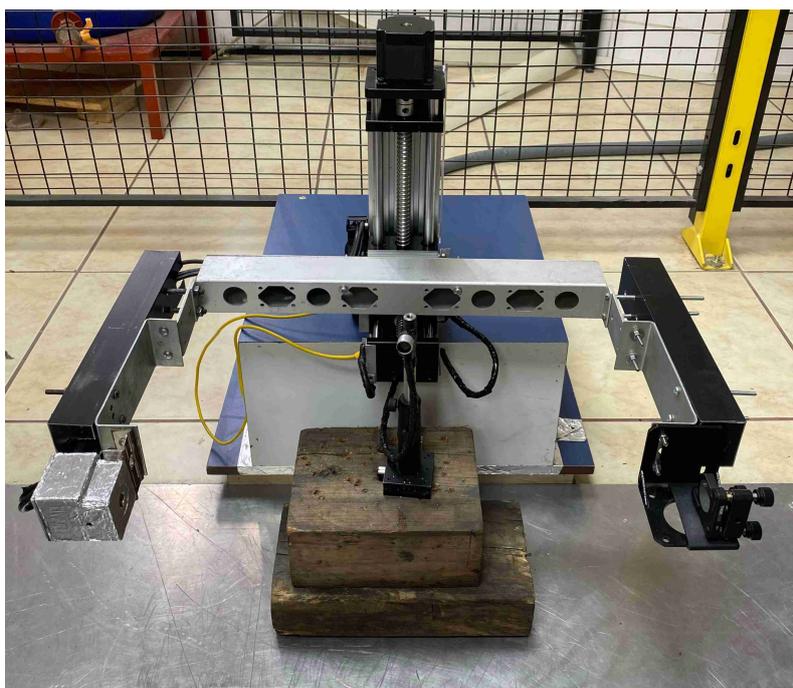


Figura 2.30: Vista Frontal del sistema

Una vista superior de la prueba sería de la siguiente manera:

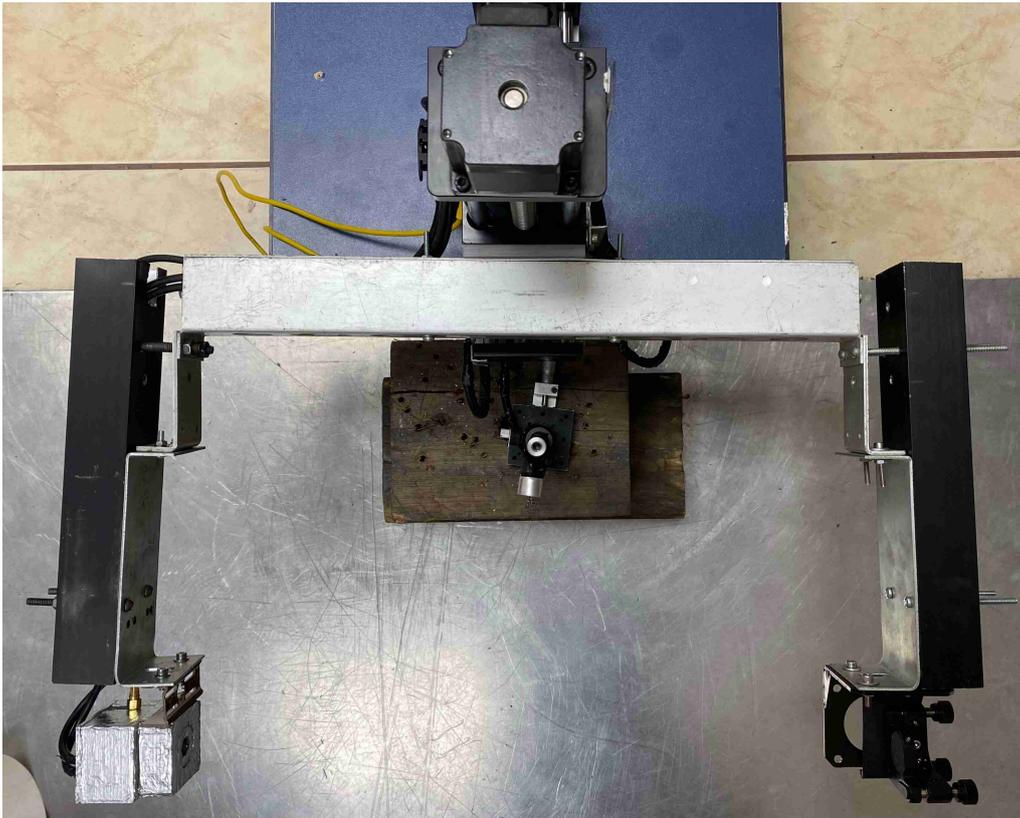


Figura 2.31: Vista Superior del sistema

El transductor ultrasónico está montado sobre una estructura ajustable con un sistema micrométrico que permite modificar con precisión su altura y posición. Esta configuración garantiza estabilidad mecánica y facilita alineaciones exactas, asegurando una interacción óptima con otros componentes del sistema, como el haz láser, según las condiciones requeridas en cada ensayo.

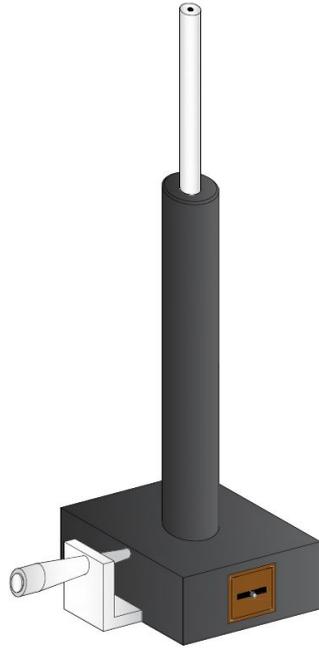


Figura 2.32: Estructura Ultrasónica

2.3 Principio de Funcionamiento

2.3.1 Alineación láser - Espejo

Para la respectiva alineación de los dos componentes, se empezó primero en acoplar una extensión adicional en el brazo de la estructura con el láser debido a que se encontraba a una distancia menor al del espejo para su alineación, luego de igualar esta distancia se procedió a encender el láser y calibrando el mismo para obtener un punto pequeño y bien definido, lo que facilitó su centrado en el espejo, debido a que incluso en condiciones de baja iluminación, un punto amplio y poco visible resultaba difícil de percibir.

Uno de los métodos utilizados para el centrado fue el uso de una tarjeta detectora de láser, específicamente diseñada para facilitar la visualización del punto emitido. Esta tarjeta, adecuada para trabajar con rangos específicos de longitud de onda, permitió alinear el láser de manera más eficiente al reflejar el punto con claridad y precisión.

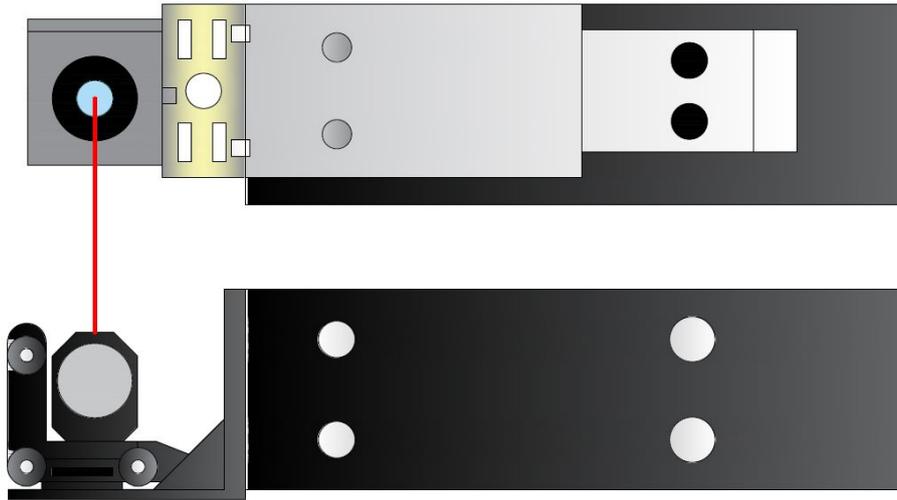


Figura 2.33: Alineación Láser-Espejo

2.3.2 Retroalimentación Óptica

La retroalimentación óptica es un proceso en el que un haz de luz, al reflejarse en una superficie o medio, regresa al sistema que lo emitió, generando una interacción entre el haz incidente y el reflejado. Este fenómeno permite medir variaciones en la trayectoria óptica, como cambios en la posición, vibraciones o propiedades del medio, y es ampliamente utilizado en sistemas de interferometría para aumentar la sensibilidad en la detección de pequeñas perturbaciones.

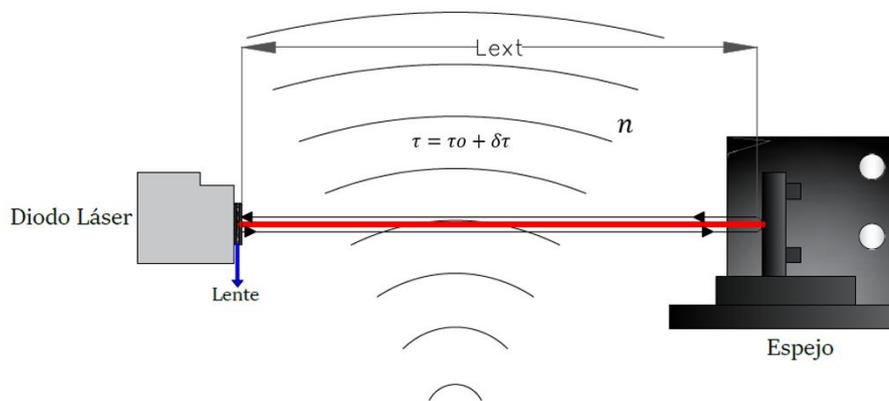


Figura 2.34: Demostración de Retroalimentación Óptica

- **Verificación de Retroalimentación Óptica**

Para confirmar la correcta retroalimentación óptica, se conectó una sonda BNC del láser a una DAQ, con el objetivo de visualizar la señal generada en tiempo real. Cuando el haz reflejado impactó exactamente en el origen, la señal registrada mostró una forma sinusoidal, indicando una interferencia constructiva. A continuación, se presenta la señal sinusoidal obtenida:

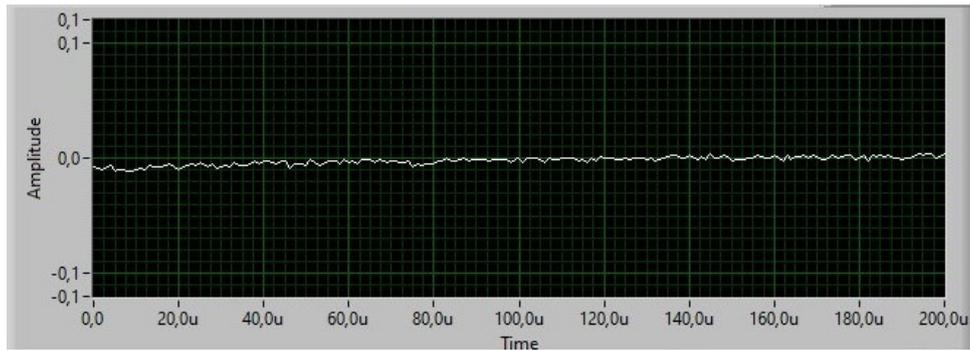


Figura 2.35: Señal no alineada

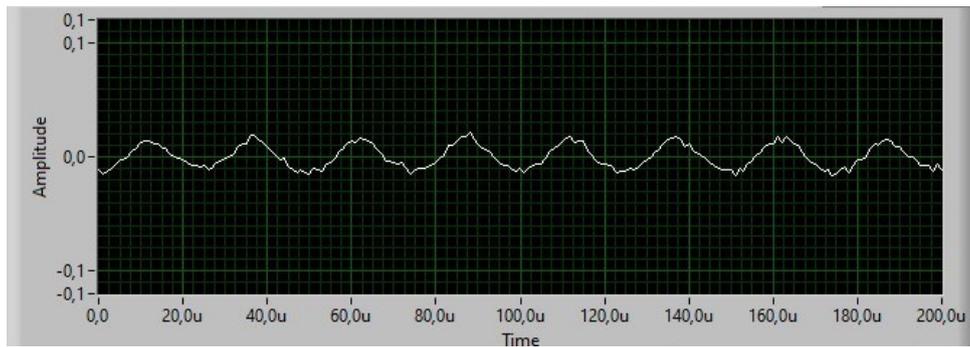


Figura 2.36: Señal de retroalimentación óptica

2.3.3 Posición Transductor Ultrasónico

Es de suma importancia fijar este elemento en un sitio determinado, eso se debe a que el diodo láser sensa la propagación de ondas que este transmite en cierta posición y al mover el ultrasonido, prácticamente correspondería a otra zona del medio y no habría como realizar una comparación real porque no se puede, en este caso se colocó el sensor estratégicamente a una distancia X respetando lo que la teoría nos dice, que por kV es un cm de distancia por seguridad, a una altura X ideal para que el cono de propagación lo perciba el láser, ciertas distancias están establecidas de la siguiente forma:

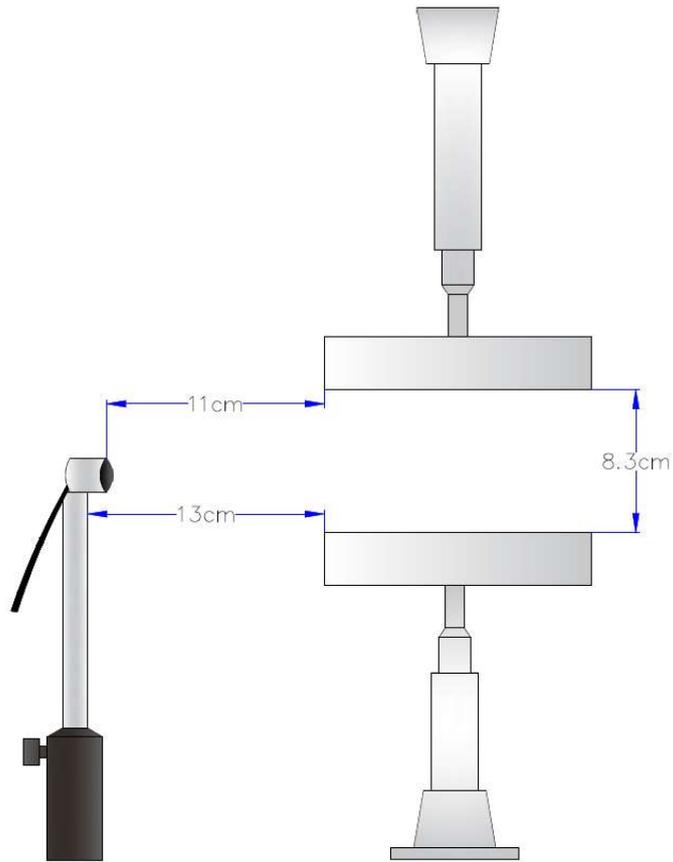


Figura 2.37: Distancias Transductor al Ultrasonico

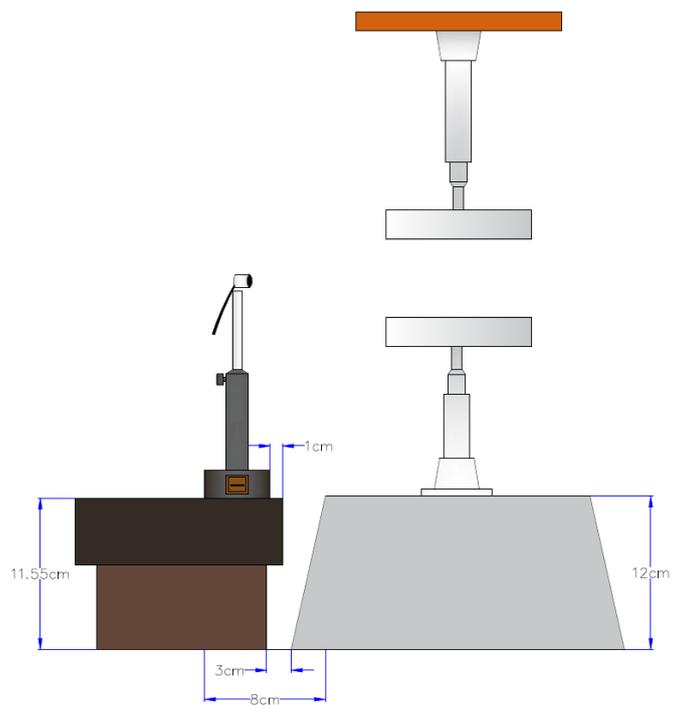


Figura 2.38: Distancias entre Estructura Transductor Ultrasonico y Medidor de Brechas

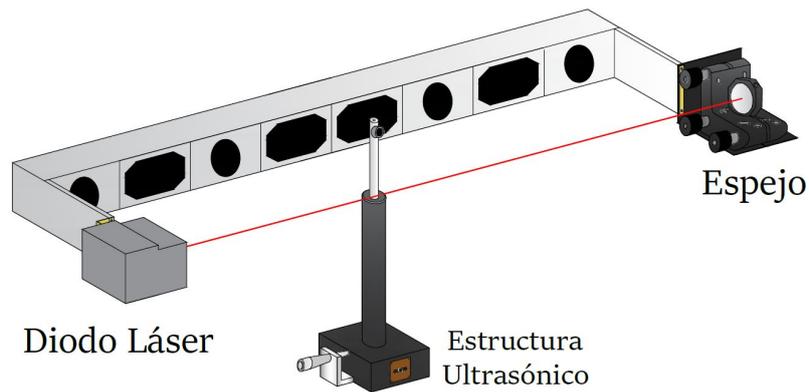


Figura 2.39: Modelo de Interferometría de Retroalimentación Óptica para Detección Optoacústica

• **Visualización Frecuencia 40 kHz con Retroalimentación Óptica**

Una vez ajustado y correctamente posicionado el transductor, se procedió a realizar una prueba con la retroalimentación óptica activa, ubicando el transductor en la misma posición utilizada durante las pruebas preliminares. Durante esta prueba, se monitoreó cuidadosamente el espectro de la señal para identificar un pico característico en la frecuencia de interés, que en este caso corresponde a 40 kHz, lo que indicaría la interacción entre el haz láser y el transductor ultrasónico. Los resultados obtenidos a través de LabVIEW se presentan en los siguientes gráficos: en el primer gráfico de la forma de onda se observa la retroalimentación óptica, mientras que en el segundo gráfico, se muestra el espectro de frecuencias del sistema, donde se identifica el pico correspondiente a los 40 kHz.

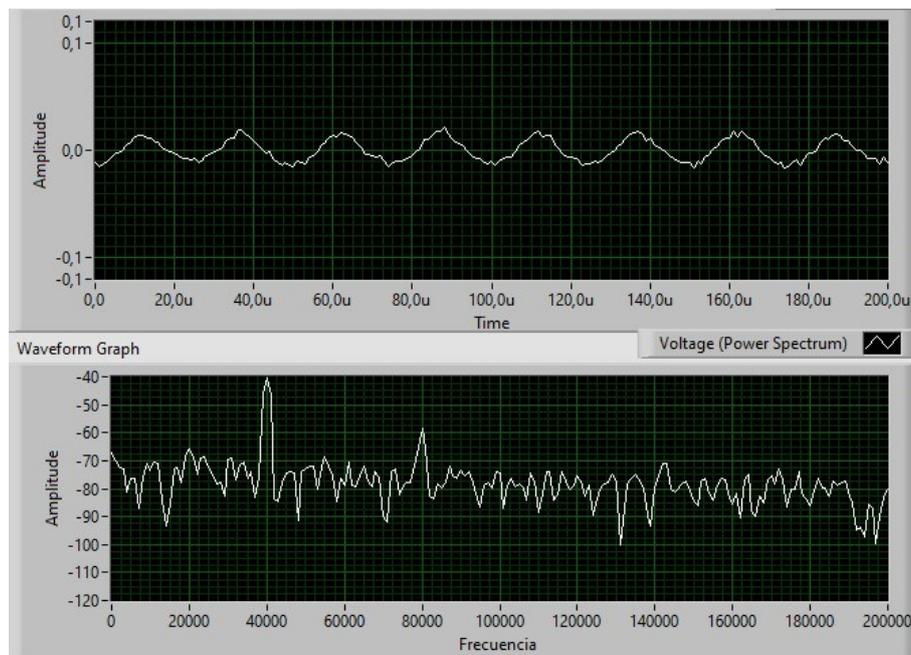


Figura 2.40: Influencia de ultrasonido en la señal de retroalimentación óptica



Figura 2.42: Centro de control Drivers



Figura 2.43: Convertidor 110 VAC - 24 VDC

- **Digital Stepper Driver**

El driver de motor paso a paso DM542T es un controlador digital de alta precisión diseñado para operar motores paso a paso de bipolar. En el setup cartesiano, se utilizan dos de estos drivers para controlar de manera independiente los motores Nema, lo que permite un control preciso del posicionamiento en los ejes X e Y.

Cada DM542T cuenta con cuatro conexiones de bobinas: A^+ , A^- , B^+ , y B^- , que se utilizan para conectar las bobinas de cada motor de paso. Estas conexiones permiten el control de la corriente y el sentido de rotación del motor, optimizando así el rendimiento y la eficiencia del sistema.

Las señales de entrada, incluyendo los pulsos y la dirección, provienen de las salidas digitales del Arduino, lo que facilita la coordinación y sincronización del movimiento de los motores. Esta integración entre el DM542T y el Arduino asegura un control fluido y preciso, esencial para el correcto funcionamiento del setup y la manipulación exacta del láser y el espejo.



Figura 2.44: Digital Stepper driver

- Stepper Motor

Los motores de paso Nema son dispositivos electromecánicos que convierten impulsos eléctricos en movimiento rotacional. Estos motores están diseñados para proporcionar un control preciso de la posición y el movimiento, operando mediante la división del giro completo en pasos discretos.

Son componentes esenciales para el movimiento preciso y controlado de la estructura de aluminio que sostiene el láser y el espejo. Cada motor está diseñado para operar de manera independiente, permitiendo el movimiento bidimensional programado de la estructura en las direcciones X e Y.

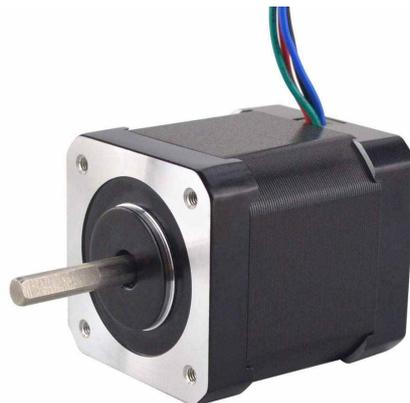


Figura 2.45: Stepper motor

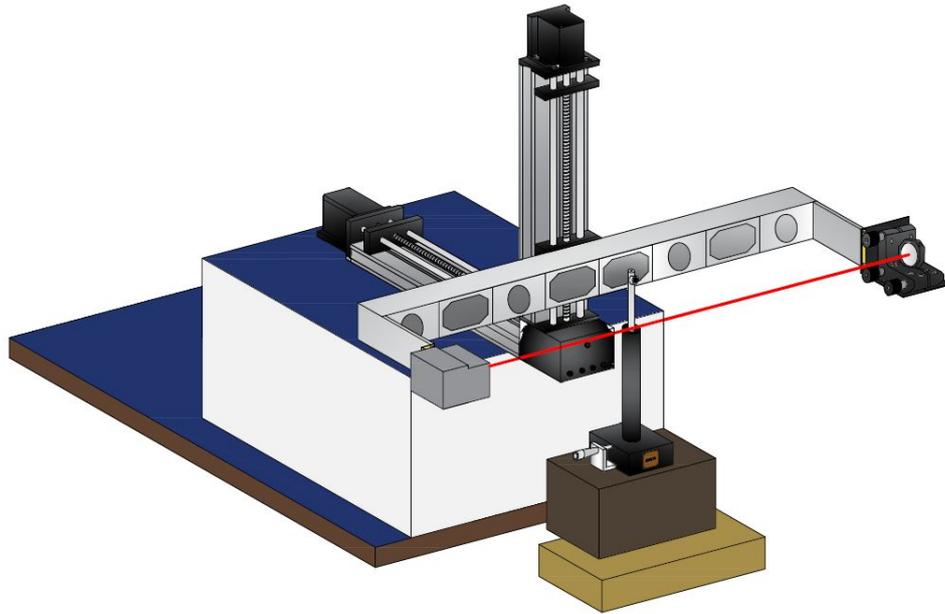


Figura 2.46: Prototipo para Interferometría de Retroalimentación Óptica para Detección Optoacústica

2.5 Interfaz de posicionamiento

2.5.1 Arduino

El Arduino Uno es una placa de desarrollo basada en el microcontrolador ATmega328P, diseñada para facilitar la creación de prototipos electrónicos. Dispone de 14 pines digitales de entrada/salida, 6 entradas analógicas, un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, una toma de alimentación, un conector ICSP y un botón de reinicio. Su capacidad para programarse fácilmente mediante el entorno Arduino IDE y su versatilidad para interactuar con diversos sensores, actuadores y componentes electrónicos hacen de esta placa una herramienta accesible y poderosa para proyectos de automatización, control y prototipado de sistemas electrónicos.



Figura 2.47: Arduino Uno

En este proyecto de titulación, el Arduino Uno cumple un rol importante en el sistema experimental, a través de sus pines digitales, genera seis señales de salida: cuatro dirigidas a los drivers de motores paso a paso, garantizando un desplazamiento preciso, y dos asignadas a los fines de carrera, que definen la referencia de coordenadas (0,0) siendo la seguridad al detener los motores en sus limites fisicos. La comunicación con la computadora se establece mediante interfaz serial, permitiendo el control remoto del movimiento y la supervisión del estado del sistema, la conexión desde el Arduino Uno hacia los componentes se refleja de la siguiente manera:

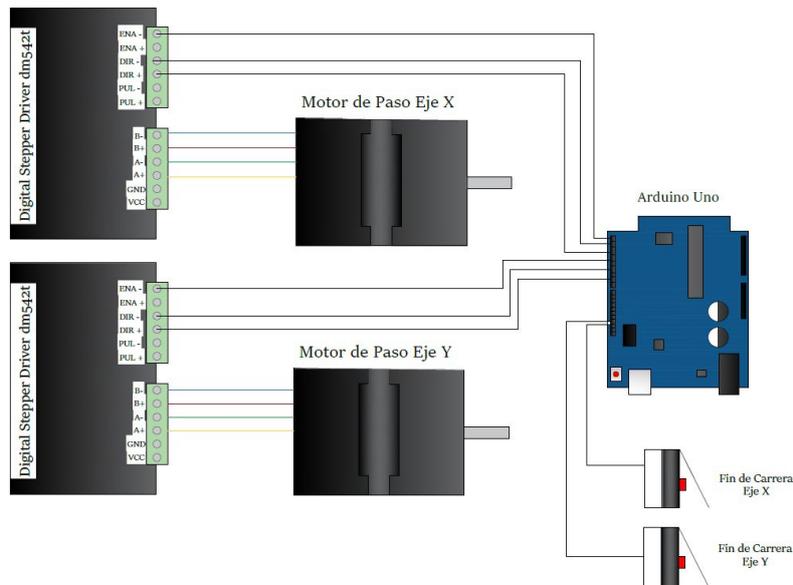


Figura 2.48: Conexiones del Arduino Uno

• **Diagrama de Bloques**



Figura 2.49: Interfaz Arduino Uno

2.5.2 LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es una plataforma de desarrollo de National Instruments que permite diseñar sistemas de prueba, control y monitoreo mediante programación gráfica. Su uso es común en adquisición de datos, instrumentación virtual y automatización, gracias a su capacidad de integración con hardware y análisis en tiempo real. En este proyecto, LabVIEW facilita la visualización y control de la posición del láser en la brecha entre electrodos, permitiendo una supervisión precisa durante las pruebas con campo eléctrico intenso. Su integración con Arduino optimiza la captura de señales y garantiza estabilidad en la adquisición de datos.

• Descripción del Sistema

Toda la interfaz simulada en LabView que permite la conexión con el Arduino Uno ha sido mediante conexión alámbrica que se le vincula al software seleccionando el puerto al cual esta conectado del computador.

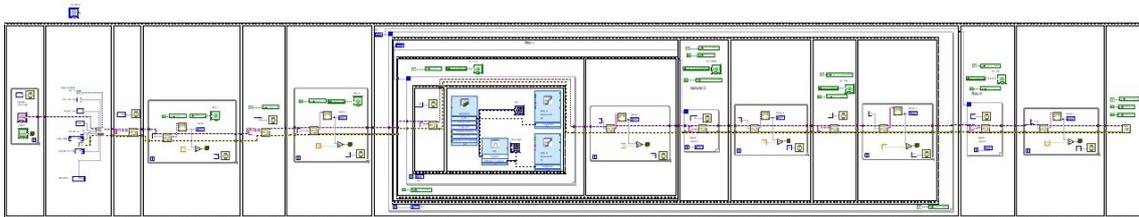


Figura 2.50: Interfaz LabView & Arduino Uno

El código implementa la comunicación entre un Arduino Uno y el DAQ 9223 para la adquisición y procesamiento de datos en un sistema de medición. Su principal función es controlar la secuencia del movimiento de los motores del eje X y Y para que el diodo láser realice el escaneo del área determinada en un centro de control virtual, permitiendo la captura secuencial de datos. A través de una serie de bucles y comparaciones, se regula el desplazamiento del sistema en función de los parámetros establecidos manualmente, asegurando la toma de 1000 datos por línea. Esto permite escanear un área determinada con precisión, coordinando la activación del sensor y la adquisición de señales ultrasónicas en cada posición del láser.

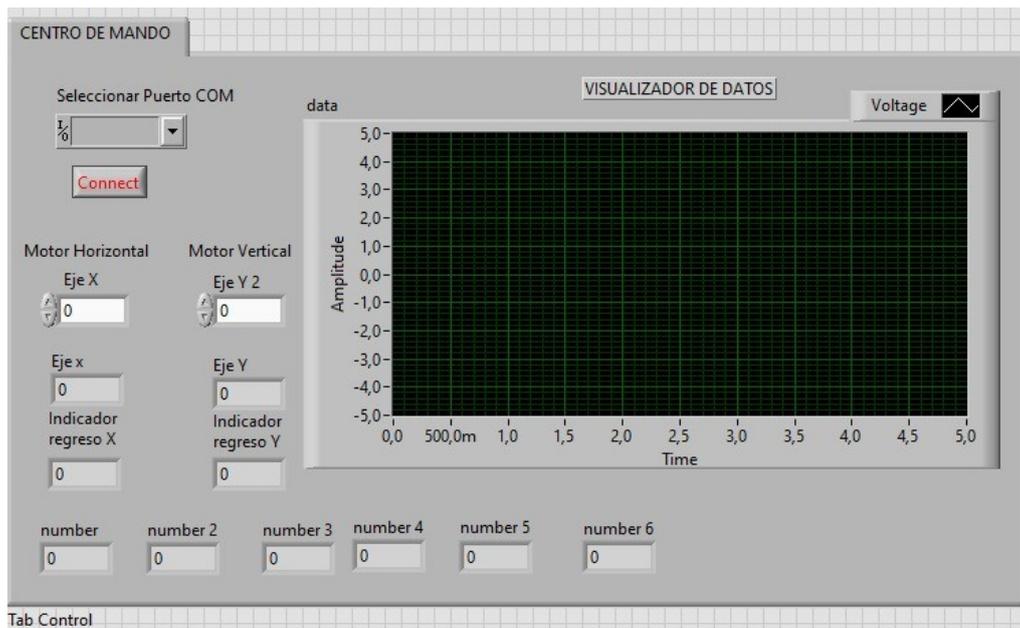


Figura 2.51: Centro de Control Virtual

Además, el código integra mecanismos de control para verificar la coherencia de los datos adquiridos y garantizar la correcta sincronización del movimiento con la captura de información. Se emplean estructuras condicionales para detectar posibles errores en la transmisión y corregir desviaciones en la trayectoria del barrido. La comunicación con LabVIEW facilita la visualización y análisis de los datos en tiempo real, proporcionando una interfaz intuitiva para supervisar el escaneo y realizar ajustes cuando sea necesario.

- **Flujograma**

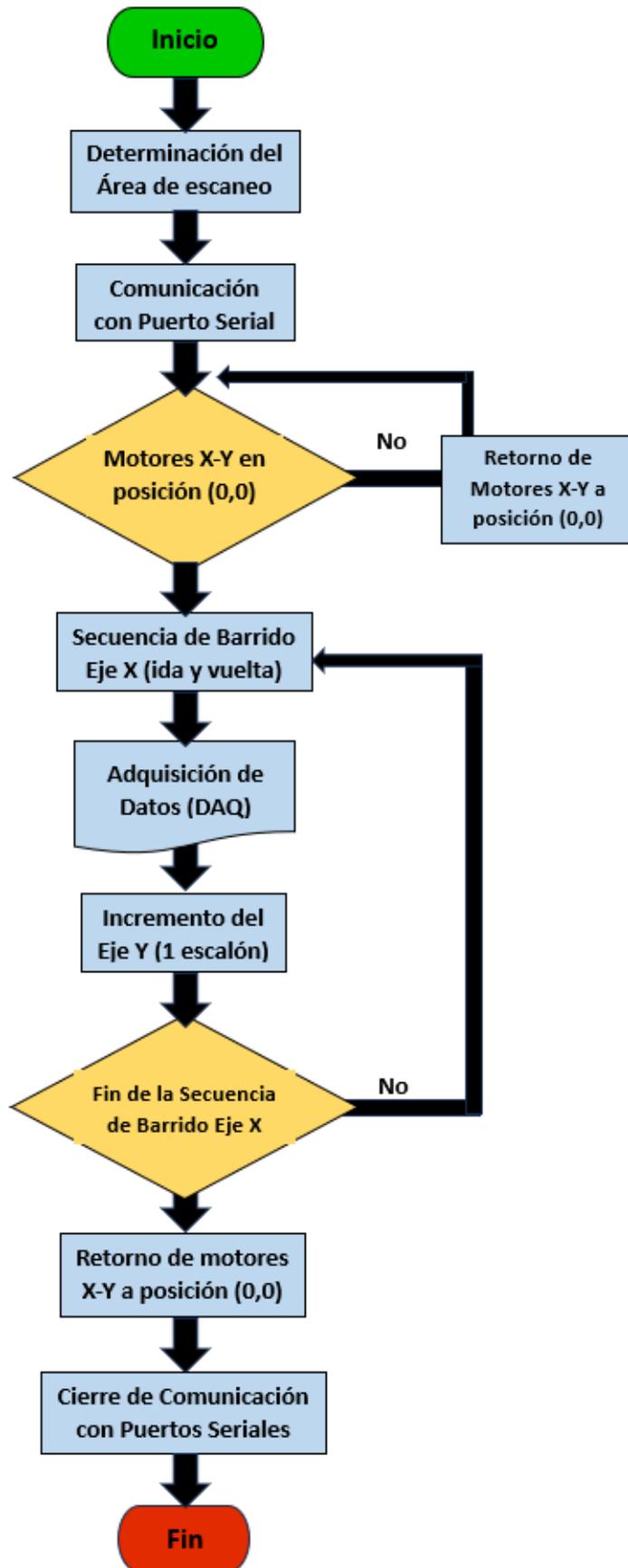


Figura 2.52: Secuencia de operación

2.6 Centro de Operación

2.6.1 Distribución

Todas las operaciones relacionadas con el sistema, incluidos ajustes, configuraciones del programa, conexiones de sondas del generador de funciones, el sistema de adquisición de datos (DAQ), y la fuente de alimentación del láser, se gestionan desde un mueble centralizado diseñado para albergar y proteger los equipos principales. Este mueble no solo organiza los componentes de manera funcional, sino que también garantiza la seguridad y eficiencia en un entorno de alta tensión.

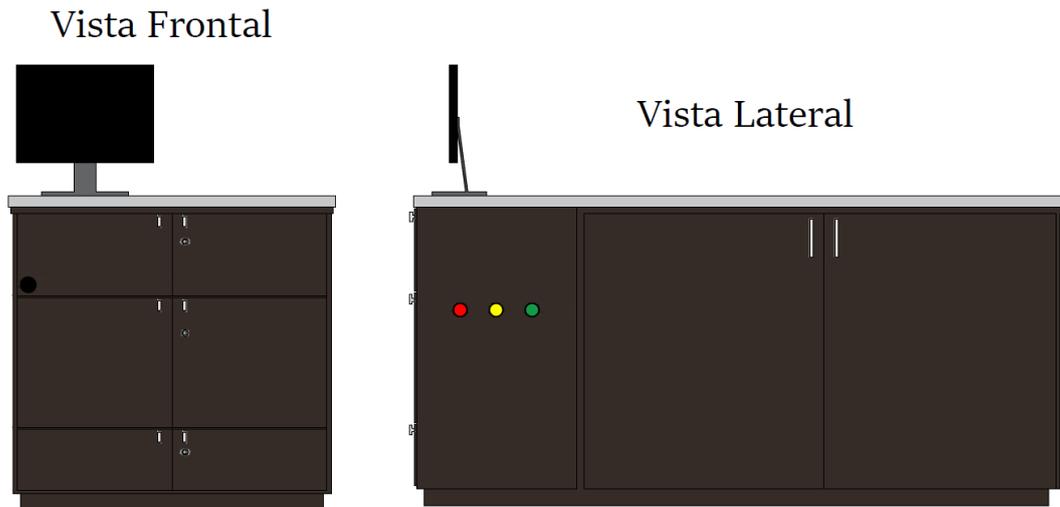


Figura 2.53: Mueble de operación

La distribución interna del mueble está cuidadosamente diseñada para optimizar el acceso y la protección de los dispositivos:

- **Compartimento superior:** Este espacio alberga los componentes de procesamiento de datos pues en su interior se encuentra el generador de funciones y el sistema CompactDAQ con su tarjeta de adquisición de datos; además a eso se sitúa el teclado, el mouse para la operación del sistema, así como la fuente de alimentación variable dedicada al diodo láser.
- **Compartimento intermedio:** En este nivel se ubica la unidad central de procesamiento (CPU), que ejecuta el software de control y adquisición de datos, además de supervisar todo el sistema. Este componente es esencial para la integración y gestión de los dispositivos conectados, proporcionando una interfaz operativa robusta y centralizada.
- **Compartimento inferior:** Este espacio contiene la regleta principal de alimentación eléctrica, desde la cual se distribuye la energía a todos los componentes del sistema. La regleta está diseñada para soportar cargas críticas,

garantizando una alimentación confiable y estable incluso en condiciones exigentes.

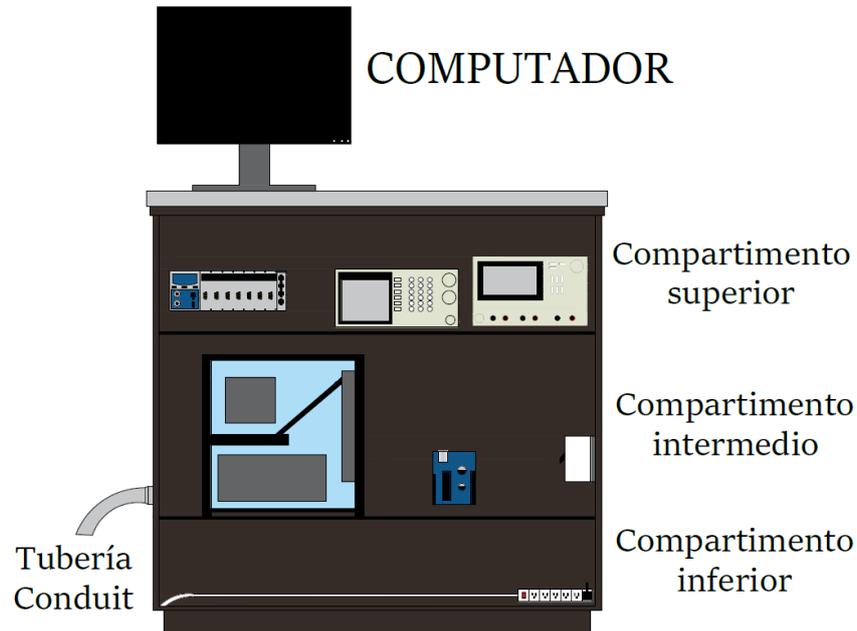


Figura 2.54: Distribución Mueble

2.6.2 Conexión de Equipos

• Láser

- Cable coaxial conectado en el puerto A0 del modulo NI 9223 DAQ.
- Cable de alimentación del láser ± 12 V para encender el mismo.
- Conexión del modulo NI 9223 al Compact cDAQ 9178



Figura 2.55: Conexión Láser

• Setup Cartesiano X-Y

- Conexión Cable apantallado de motores a drivers.
- Conexión Drivers con Arduino Uno.
- Conexión Arduino Uno con Computador

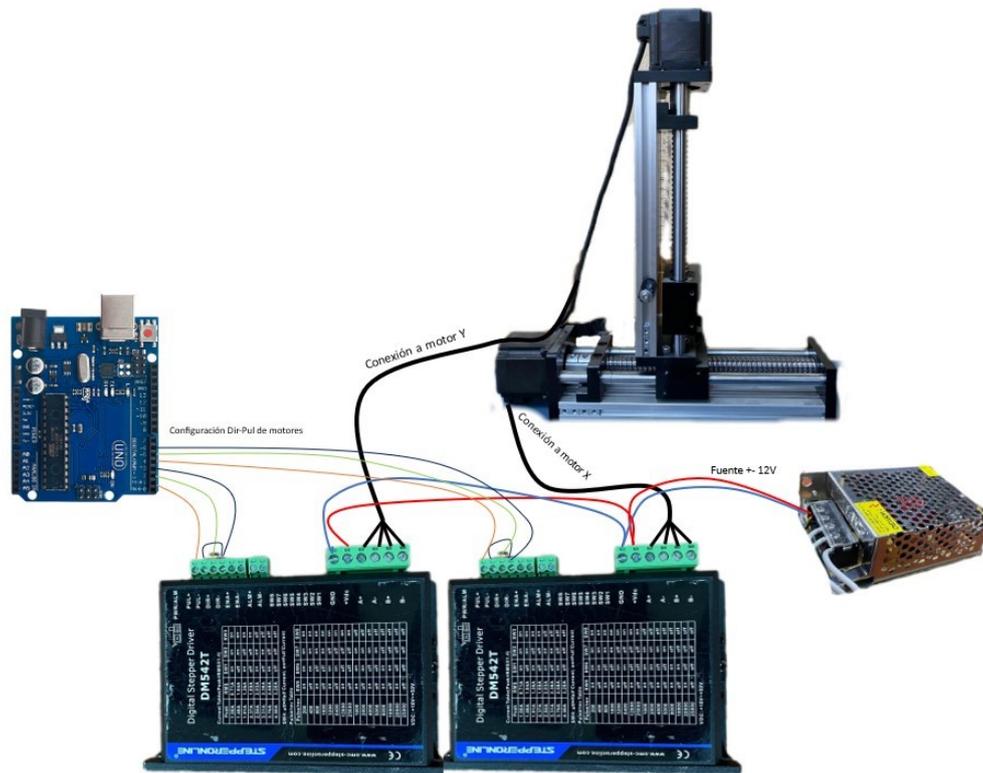


Figura 2.56: Conexión Arduino - Drivers - Motores

- **Transductor Ultrasónico**

- Conexión mediante sonda BNC al generador de funciones

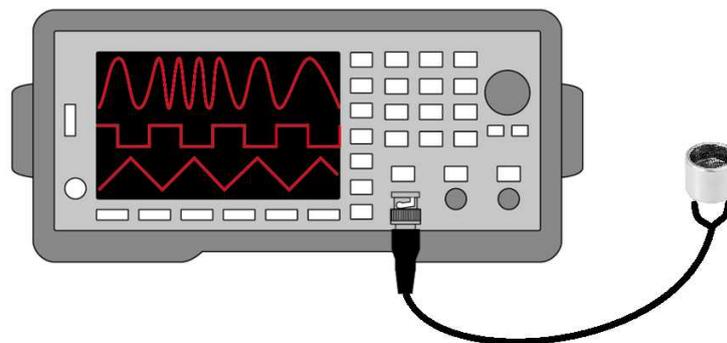


Figura 2.57: Generador de Funciones a Transductor

2.7 Factores que considerar

Requiere considerar diversas propiedades de los materiales presentes en el *setup* del método de interferometría de retroalimentación óptica para detección optoacústica, debido a la estructura de aluminio sobre la cual fue construida y los dispositivos sensibles integrados en él.

- **Influencia del Aluminio en un Entorno de Alta Tensión**

- Al trabajar en un entorno de alta tensión, en este escenario se toma en cuenta la baja resistividad del aluminio ($2.82 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$) como su alta conductividad ($3.5 \times 10^7 S/m$) que al tener proximidad a un campo eléctrico intenso podría permitir la formación de corrientes parasitas inducidas, generando calentamiento o interferencias electromagnéticas las cuales afectarían tanto la estabilidad del sistema como la precisión de componentes sensibles como el láser, arduino y driver.

Para resolver este inconveniente, se decidió aislar la base en la que se asienta el sistema cartesiano X - Y construyéndola de madera, un material aislante que evita el contacto directo con la placa aterrada del laboratorio. Además, para proteger la estructura de aluminio en donde se desarrolla el método de interferometría, se añadió una pieza de ABS (plástico) que sujeta mediante tornillos a la estructura aluminica y el setup cartesiano X-Y para aislar y así proteger la integridad de componentes.

- **Protección del Diodo Láser contra Interferencias Electromagnéticas**

Debido a la susceptibilidad de la señal óptica a interferencias electromagnéticas, estas pueden introducir ruido y afectar la precisión en la detección optoacústica. Para mitigar estos efectos, se ha desarrollado una carcasa fabricada mediante impresión 3D, diseñada específicamente para funcionar como una jaula de Faraday. Su estructura ligera y adaptable proporciona un blindaje electromagnético eficiente, bloqueando perturbaciones externas y garantizando la estabilidad del sistema de detección.



Figura 2.58: Protección al diodo láser mediante carcasa 3D

Como medidas adicionales, a pesar de ya estar el diodo láser protegido dentro de una carcasa plástica 3D, se decidió reforzar su protección recubriéndolo con aluminio. Este recubrimiento adicional permite desviar cualquier descarga eléctrica directamente a tierra, mejorando así la seguridad y la fiabilidad del sistema [39].

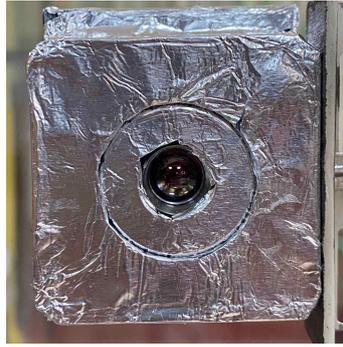


Figura 2.59: Protección al diodo láser mediante Jaula de Faraday

- **Protección de Componentes Electrónicos y Reubicación del Sistema de Comunicación**

Se llevó a cabo el aterramiento de todos los componentes y la implementación de medidas de protección contra descargas electrostáticas para los conductores y demás elementos del sistema, asegurando así la integridad del equipo y la fiabilidad de los resultados.

Dado que el conjunto de comunicación y control de los motores paso a paso se encontraba en la superficie de la estructura, existía un riesgo considerable de sufrir descargas al estar expuesto a altas tensiones cercanas. Para mitigar este riesgo, se optó por aprovechar el espacio hueco interno de la estructura de madera para reubicar el conjunto de comunicación. Como medida adicional de protección, se recubrió el interior del compartimento con papel aluminio, creando una jaula de Faraday que protege eficazmente los equipos frente a interferencias electromagnéticas y descargas eléctricas [39].

Para proteger los motores de posibles efectos causados por la inducción electromagnética, se recubrieron los conductores con papel aluminio. Posteriormente, se aplicó una capa de cinta aislante sobre el recubrimiento para garantizar un mayor nivel de protección y aislamiento.



Figura 2.60: Protección de conductores de Motores de paso



Figura 2.61: Jaula de Faraday para centro de comunicación

Tras realizar la prueba de continuidad en todas las superficies forradas con papel aluminio de la estructura de madera, se procedió a efectuar el aterramiento general, conectando un punto a la placa de tierra del laboratorio de Alta Tensión, como se ilustra en la figura siguiente:



Figura 2.62: Aterramiento Estructura de Interferometría Óptica

- **Organización del Cableado y Aterramiento Estructura para Interferometría**

Dado que la estructura se encontraba a una distancia de 4 metros del centro de control (computadora), la comunicación entre todos los componentes de la estructura y la computadora era de tipo alámbrica, lo que generaba una acumulación desordenada de conductores sueltos en el piso. Para corregir esta situación, tanto desde el punto de vista estético como de protección, comenzamos etiquetando cada conductor y se instaló una tubería conduit de una pulgada. Esta tubería, al ser hermética y tener recubrimiento de PVC, no solo proporciona seguridad y protección física contra daños mecánicos, sino que también actúa como un blindaje, minimizando el riesgo de interferencias electromagnéticas y protegiendo los conductores de posibles efectos derivados de la alta tensión presente en el entorno [37].



Figura 2.63: Conductores sin etiqueta y sin protección



Figura 2.64: Tubería Conduit 1" instalada

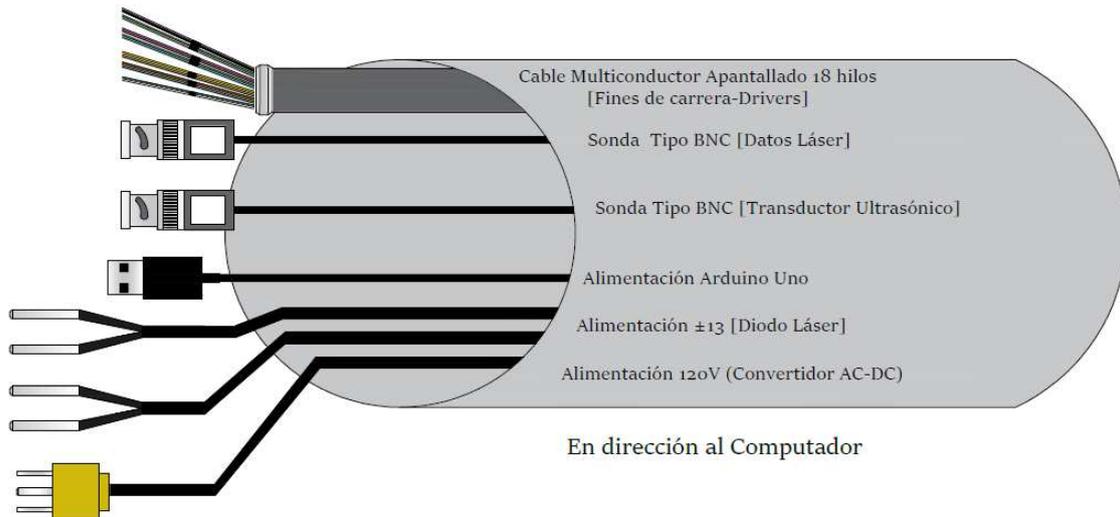


Figura 2.65: Cablerio interno de tubería Conduit

- **Aterramiento de la alimentación del Mueble de Operación**

Una vez que los equipos más vulnerables fueron protegidos, el último paso consistió en asegurar el mueble de operación, el cual cuenta con varios compartimentos, cada uno con tomacorrientes alimentados por dos conductores principales (línea-neutro) conectados a la red de tomacorrientes del laboratorio de alta tensión.

Lo primero que se realizó fue la verificación de la conexión a tierra de cada uno de los tomacorrientes del mueble. Al detectar que la conexión a tierra estaba ausente debido a que el conductor que alimentaba todo el mueble era un cable de dos hilos, se procedió a reemplazarlo por uno de tres hilos. Posteriormente, se retiraron todos los conductores antiguos y se realizó una nueva instalación de los tomacorrientes desde cero, asegurando que las conexiones a tierra fueran correctas, dado que son esenciales para la protección contra descargas. Esto es especialmente crítico porque uno de estos tomacorrientes alimenta la fuente de voltaje que suministra energía a los drivers y motores. Para garantizar la seguridad y el funcionamiento adecuado del sistema, se realizaron empalmes correctamente realizados y debidamente aislados con cinta aislante.

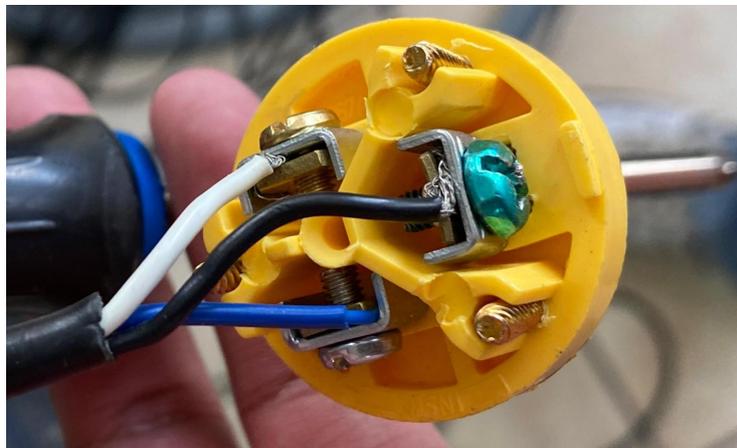


Figura 2.66: Conductor de 3 hilos

- **Protección contra Inducción Electromagnética de Componentes en Banco de Control**

Dentro de este mueble se encuentran varios componentes clave para el funcionamiento del sistema. Estos incluyen la computadora, el módulo CompactDAQ 9178, que aloja la tarjeta de adquisición de datos NI 9223, el generador de funciones, y la fuente de alimentación del láser. Dado que estos equipos pueden ser sensibles a interferencias electromagnéticas, se implementaron medidas de protección contra ruido, inducción e interferencia.

El generador de funciones, al ser una pieza fundamental para la sincronización de la DAQ, se encuentra dentro de una carcasa metálica de un CPU desmantelado junto con el módulo CompactDAQ 9178 que aloja la tarjeta de adquisición de datos NI 9223. Esta configuración protege ambos componentes contra interferencias electromagnéticas, ya que la carcasa metálica actúa como un blindaje contra el ruido y la inducción electromagnética. El generador de funciones asegura que la señal ultrasónica transmitida a 40 kHz sea fija y constante, lo cual es esencial para el correcto funcionamiento del sistema. Estas medidas, junto con la protección física proporcionada por la carcasa, garantizan la estabilidad de las señales y el rendimiento óptimo de los equipos, incluso en un entorno de alta tensión.

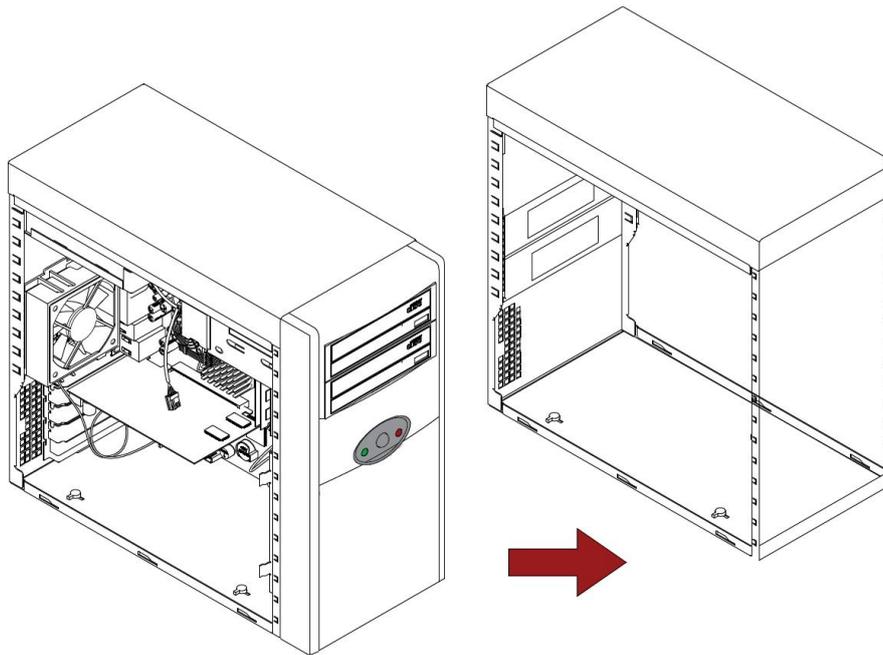


Figura 2.67: Carcasa CPU

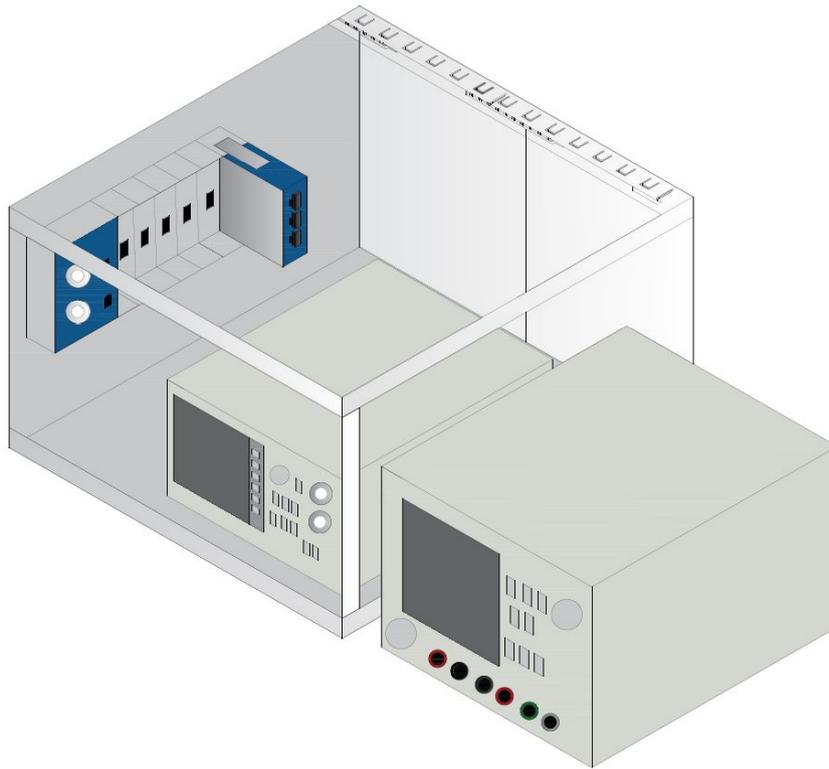
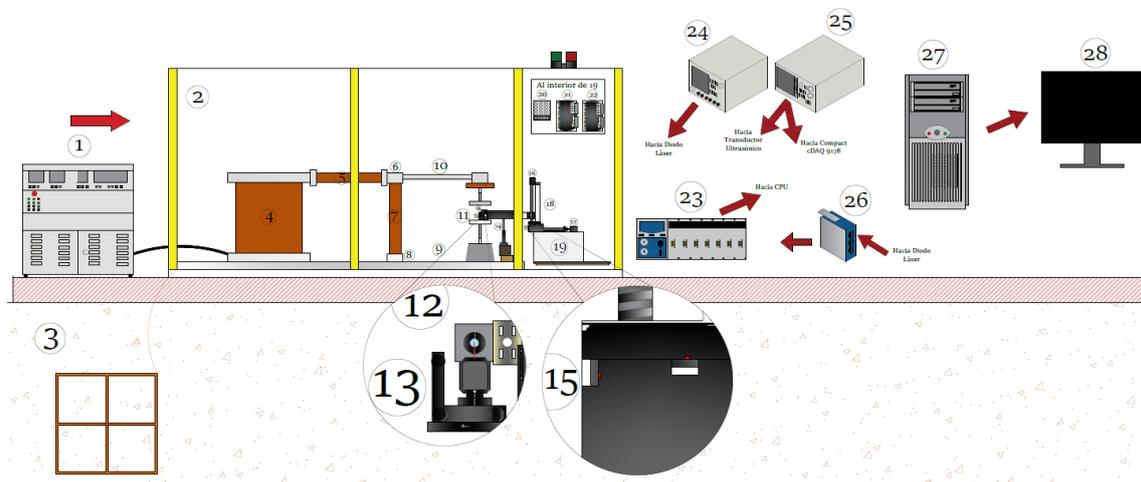


Figura 2.68: Vista Interior de Carcasa de Protección

2.7.1 Vista Global



Descripción

- | | | |
|--|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> 1. Módulo de Control (HV 9103) 2. Jaula de Faraday Laboratorio Alta Tensión 3. Malla de Puesta a Tierra 4. Transformador (HV 9105) 5. Resistor de Carga (HV 9121) 6. Copa de Conexión (HV 9109) 7. Capacitor de Medida (HV 9141) 8. Base de Conexión (HV 9110) 9. Placa de Puesta a Tierra | <ul style="list-style-type: none"> 10. Barra de Conexión (HV 9108) 11. Medidor de Distancia entre Chispa (HV 9133) 12. Diodo Láser 13. Espejo 14. Transductor Ultrasónico 15. Fines de Carrera Eje X-Y 16. Motor de paso Eje Y 17. Motor de paso Eje X 18. Setup Cartesiano | <ul style="list-style-type: none"> 19. Cajón de Protección 20. Convertidor AC/DC 120/12 V 21. Digital Stepper Driver para Eje X 22. Digital Stepper Driver Eje Y 23. Compact cDAQ 9178 24. Fuente Variable DC 25. Generador de Funciones 26. Tarjeta de Adquisición NI 9223 27. CPU 28. Monitor |
|--|--|---|

Figura 2.69: Vista Global

2.8 Procesamiento de Señales

2.8.1 Componentes

- **Sistema de Adquisición de Datos (DAQ)**

Un sistema de adquisición de datos (DAQ), por sus siglas en inglés Data Acquisition es una herramienta esencial en ingeniería, investigación y automatización, cuyo propósito es medir, registrar y analizar señales físicas provenientes de distintos sensores y dispositivos. Estas señales, que representan magnitudes como temperatura, presión, vibración, desplazamiento, voltaje, corriente o sonido, son procesadas y convertidas en datos digitales para su posterior estudio o interpretación.

El funcionamiento de una DAQ se basa en la integración de tres componentes fundamentales. En primer lugar, los sensores o transductores son los encargados de captar las variables físicas y transformarlas en señales eléctricas proporcionales, generalmente analógicas. Luego, un convertidor analógico-digital (ADC) toma estas señales analógicas y las convierte en información digital que puede ser manejada por sistemas computacionales. Finalmente, un software de adquisición y análisis permite capturar, visualizar, procesar y almacenar los datos obtenidos de forma eficiente, brindando herramientas de interpretación y diagnóstico.

- **Módulo de Adquisición de Datos Analógicos NI 9223**

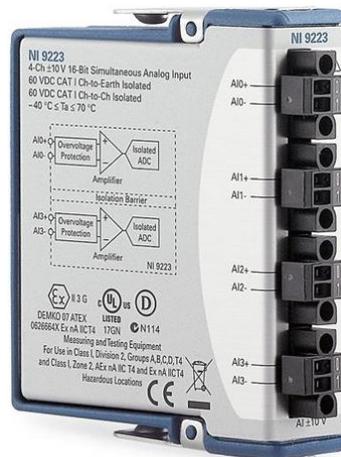


Figura 2.70: Módulo NI 9223

En este trabajo se emplea el módulo NI 9223, desarrollado por National Instruments, para aplicaciones de adquisición de datos de alta velocidad. Este módulo permite medir señales analógicas a una tasa de muestreo de hasta 1 MS/s por canal, ideal para capturar fenómenos dinámicos de alta frecuencia. Ofrece cuatro canales diferenciales con un rango de entrada configurable de ± 10 V, garantizando mediciones precisas.

El NI 9223 utiliza un convertidor analógico-digital (ADC) de 16 bits, lo que asegura una adecuada resolución en las señales captadas. Al formar parte

de la plataforma CompactRIO, se integra fácilmente en sistemas modulares y robustos, y su compatibilidad con el software LabVIEW permite desarrollar interfaces gráficas y algoritmos personalizados para el procesamiento en tiempo real, visualización y almacenamiento de datos.

- **Chasis CompactDAQ 9178:**



Figura 2.71: Chasis CompactDAQ 9178

El módulo NI 9223 se encuentra instalado en el terminal 8 del chasis CompactDAQ 9178. Este chasis es un dispositivo modular diseñado para centralizar y gestionar múltiples módulos de adquisición de datos. Proporciona sincronización precisa entre los módulos conectados y permite la transmisión eficiente de los datos hacia un sistema computacional mediante una conexión USB.

El CompactDAQ 9178 incluye salidas digitales programables, como el PFI0 (Programmable Function Interface), que en este proyecto se utiliza para generar señales de sincronización y control necesarias durante los procesos de adquisición. Este puerto juega un papel crucial al coordinar las operaciones entre el NI 9223 y otros sistemas involucrados en los experimentos.

2.8.2 Integración y funcionalidad conjunta:

El chasis CompactDAQ 9178 y el módulo NI 9223 trabajan en conjunto para lograr una adquisición de datos eficiente y precisa. Mientras que el NI 9223 es responsable de capturar señales analógicas provenientes de los sensores de alta velocidad de muestreo (diodo láser), el CompactDAQ 9178 asegura que estas señales sean sincronizadas correctamente con el resto del sistema y enviadas al software LabVIEW para su procesamiento. La salida PFI0 del chasis se configura para proporcionar pulsos de sincronización, que aseguran que los datos adquiridos estén alineados temporalmente con los eventos críticos del experimento.

2.8.3 Sincronización entre la DAQ y el Generador de Funciones

La sincronización entre la DAQ y el generador de funciones es un proceso crítico para garantizar la precisión y la coherencia en la adquisición de datos. Este proceso

asegura que las señales captadas por la DAQ estén alineadas temporalmente con las señales generadas por el generador de funciones, permitiendo que la adquisición se realice a la frecuencia deseada. En este proyecto, la frecuencia de sincronización es de 40 kHz, que corresponde a la frecuencia de excitación del transductor ultrasónico.

La falta de sincronización puede generar datos desfasados o inconsistentes, dificultando el análisis y afectando la integridad de los resultados experimentales. Por lo tanto, la sincronización precisa es fundamental para capturar las señales ópticas generadas durante los experimentos con exactitud.

- **Conexión física para la sincronización**

La conexión entre la DAQ y el generador de funciones se realiza utilizando el puerto PFI0 (Programmable Function Interface) del chasis CompactDAQ 9178 como entrada de sincronización. Este puerto está conectado a la salida del channel 1 del generador de funciones mediante una sonda.



Figura 2.72: Conexión para Sincronización

PFI0 como entrada: Este puerto recibe la señal de referencia de sincronización enviada por el generador de funciones. Esta señal actúa como un disparador (trigger) que sincroniza las operaciones de adquisición en la DAQ con la frecuencia generada, asegurando que las muestras capturadas coincidan exactamente con los ciclos de la señal ultrasónica.

CHANNEL 1: Ubicado en la parte frontal del generador de funciones, este conector emite señales de referencia a la frecuencia de operación establecida, en este caso, 40 kHz. Este pulso de sincronización es esencial para coordinar el sistema completo.

- **Validación de Funcionalidad**

La verificación de la funcionalidad del sistema se realizó configurando el generador de funciones y asegurando su integración con el CompactDAQ y el sistema de detección láser. El generador emitió dos señales esenciales: una señal cuadrada de 40 kHz para la sincronización, conectada al CompactDAQ mediante el pin PFI0, y una señal sinusoidal de la misma frecuencia, destinada al transductor ultrasónico para generar ondas acústicas detectables por el láser.

Señal Cuadrada para Sincronización

La señal cuadrada fue clave para garantizar una sincronización precisa gracias a sus transiciones abruptas, las cuales se mantuvieron con una amplitud de

4.100 Vpp, adecuada para los niveles de voltaje compatibles con lógica TTL (Transistor-Transistor Logic). Este estándar digital define los niveles de voltaje necesarios para representar los estados lógicos "alto" y "bajo", normalmente entre 0V y 5V, lo que asegura una interpretación fiable por parte de la tarjeta de adquisición sin riesgo de daño al sistema.

Señal Sinusoidal para Transductor Ultrasónico

Por otro lado, la señal sinusoidal maximizó la eficiencia del transductor ultrasónico al minimizar distorsiones y armónicos no deseados, utilizando una amplitud de 10 Vpp para garantizar una transmisión clara y efectiva. Ambas señales, con sus características únicas, fueron procesadas en tiempo real por la tarjeta de adquisición NI 9223, conectada directamente al láser mediante el terminal AIO, demostrando la capacidad del sistema para manejar señales tanto digitales como analógicas de manera eficiente.

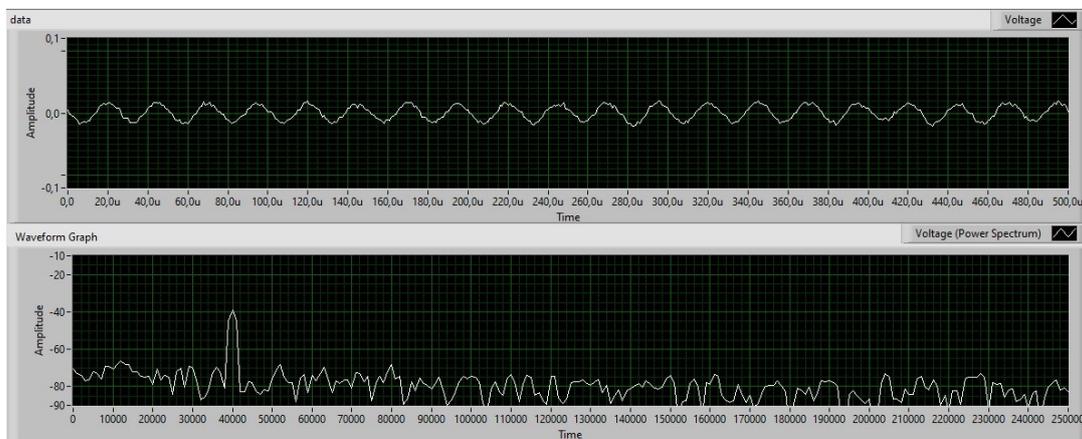


Figura 2.73: Prueba de sincronización

2.8.4 Proceso de Adquisición

La siguiente figura representa el movimiento de la estructura tras la ejecución del programa. En este proceso, el eje X cumple un rol fundamental, ya que en él se realiza el barrido horizontal del láser, abarcando un desplazamiento de 50 mm en cada ciclo. Este procedimiento se repite de manera secuencial a medida que la estructura incrementa su posición en el eje Y en pasos de 1 mm, asegurando un escaneo sistemático y preciso del área de estudio.

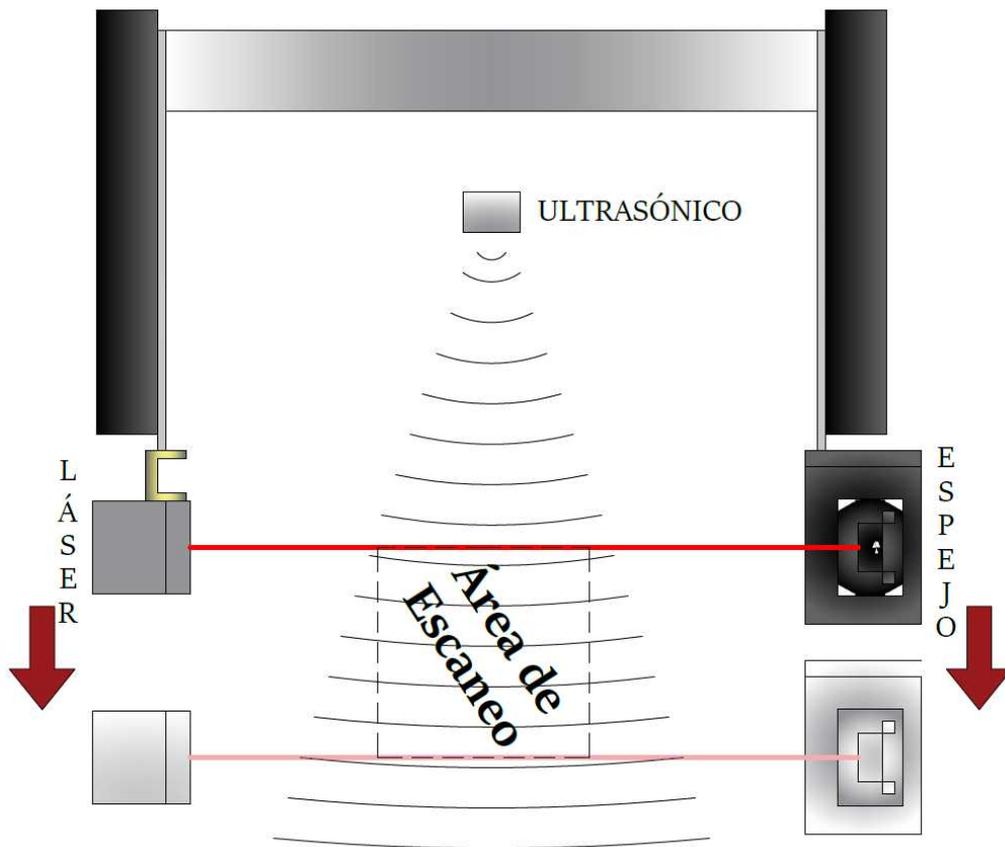


Figura 2.74: Representación Movimiento Estructura

- **Configuración General DAQ**

Se configuró la DAQ dentro de LabVIEW en modo N Samples, se estableció la adquisición de datos con un total de 1000 muestras por barrido horizontal del láser, a una tasa de muestreo de 1 MHz (1 millón de muestras por segundo). Esta configuración se implementó para garantizar una captura precisa y detallada de las señales optoacústicas dentro de un área de escaneo de 50 x 50 mm, proporcionando un registro amplio y de alta resolución.

Durante la ejecución del proceso, la adquisición de datos se llevó a cabo para cada posición del diodo láser, con un desplazamiento incremental en pasos de 1 mm. Adicionalmente, dentro de la misma configuración del sistema, se estableció un rango de entrada de señal de -10 V a +10 V, definido en el generador de funciones encargado de la sincronización. Para optimizar la calidad de los datos y minimizar la influencia del ruido eléctrico, se utilizó una configuración de adquisición diferencial, mejorando así la precisión en las mediciones.

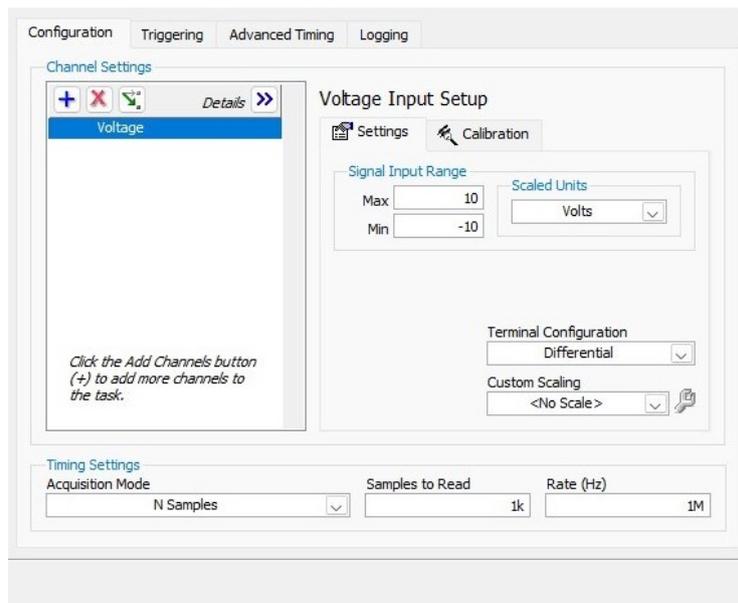


Figura 2.75: Configuración DAQ

- **Formato de Archivo**

Una vez finalizado el mapeo del área asignada en LabVIEW, los datos adquiridos se transfieren al módulo Write To Measurement File, encargado de su almacenamiento en el formato de archivo especificado. En las primeras fases de prueba, los datos se guardaron en formato .xlsx para permitir su visualización inmediata mediante gráficos en Excel. Este procedimiento garantiza un almacenamiento estructurado de la información, facilitando su análisis posterior a través de herramientas estadísticas y de visualización, al tiempo que asegura la trazabilidad y precisión de las mediciones registradas.

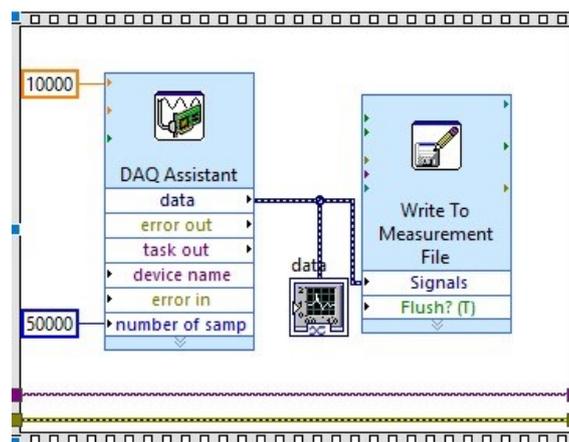


Figura 2.76: Write to measurement

- **Formato .xlsx**

Los datos recopilados en una sola columna se seleccionaban para su representación gráfica en Excel, herramienta clave en las primeras etapas para analizar la forma de la señal, identificar patrones en la propagación de ondas ultrasónicas y detectar ruidos. Además, Excel facilitó la verificación del volumen

de datos registrados al enumerar automáticamente cada fila, lo que permitió una comprobación rápida antes de aplicar técnicas avanzadas de procesamiento y visualización. Otros tipos de archivos manejados por la DAQ son:

- **TDMS:** Technical Data Management Streaming
- **LVM:** LabView Measuring File
- **TXT:** Archivo de texto plano

2.9 Procesamiento de imágenes

El procesamiento de imágenes resultó ser una etapa crucial para analizar los datos adquiridos mediante el sistema de la DAQ. Inicialmente, se utilizó el formato `.LVM` para almacenar la información, debido a fallas con el formato `.xlsx`, pues este presentó limitaciones y errores que impedían guardar la totalidad de los datos esperados al esperar más del millón de datos, comprometiendo la integridad del análisis. El formato `.LVM` demostró ser más confiable para manejar grandes volúmenes de información generados durante los experimentos.

Posteriormente, se implementó un sistema de visualización de los datos utilizando MATLAB. Esta herramienta se seleccionó debido a su capacidad para aplicar diversos filtros y realizar representaciones gráficas en múltiples dimensiones. Con MATLAB, se lograron visualizar los datos tanto en representaciones bidimensionales (2D) como tridimensionales (3D), lo que permitió una comprensión más profunda de las características de las señales ultrasónicas.

2.9.1 Datos Brutos en la Adquisición de Señales

Durante la adquisición de datos en formato `.LVM`, se identificó que las señales registradas correspondían a datos brutos, es decir, sin procesamiento previo. Esta característica dificultaba el análisis espectral y la obtención de imágenes de alta calidad en MATLAB, ya que la señal contenía componentes no deseadas y variaciones que podían afectar la interpretación de los resultados. Para abordar esta situación, se implementaron técnicas de filtrado y procesamiento de datos con el objetivo de optimizar la calidad de la información adquirida y mejorar la precisión en el análisis, tales como:

- **Aplicación de Filtros**

Se aplicó un filtro pasa banda Butterworth de segundo orden con frecuencias de corte de 38 kHz y 42 kHz para aislar las componentes relevantes de la señal ultrasónica y eliminar aquellas que no aportaban al análisis. Debido a que los datos adquiridos en LabVIEW corresponden a señales brutas, el filtrado mejoró su calidad antes del procesamiento en MATLAB, optimizando la representación de la propagación de las ondas ultrasónicas.

La función de transferencia del filtro está dada por [55]:

$$H(s) = \frac{s^2}{s^2 + \frac{\omega_c}{Q}s + \omega_c^2} \quad (2.3)$$

donde:

$H(s)$ representa la función de transferencia del filtro en el dominio de Laplace.

s es la variable compleja de Laplace.

ω_c es la frecuencia central en radianes por segundo.

Q es el factor de calidad, que determina la selectividad del filtro.

Cabe destacar que esta ecuación representa el filtro en su forma analógica continua. Para su implementación en MATLAB, el filtro se diseñó en el dominio digital mediante la función `butter`, considerando los siguientes parámetros:

- Frecuencia de corte inferior: $f_{\text{cutlow}} = 38000$ Hz.
- Frecuencia de corte superior: $f_{\text{cuthigh}} = 42000$ Hz.
- Frecuencia de muestreo: $f_s = 1000000$ Hz.
- Orden del filtro: 2.

• Definición de Rangos de Interés

Además del filtrado, el procesamiento de datos incluyó la selección de rangos específicos de interés. Estos rangos fueron definidos para identificar y extraer las señales más representativas dentro del mapeo realizado, permitiendo centrar el análisis en las zonas de mayor calidad y relevancia. Esta estrategia aseguró que la información utilizada en el estudio reflejara de manera óptima el comportamiento de la onda ultrasónica bajo la influencia del campo eléctrico.

2.9.2 Medidas Adicionales

• Implementación de filtros en prueba de sincronización

Para optimizar la calidad de las imágenes obtenidas, se realizó una prueba integrando un sistema de filtrado adicional en LabVIEW, con el propósito de evaluar su impacto en la señal antes de la adquisición. Esta prueba permitió verificar la sincronización entre la DAQ y el generador de funciones, asegurando que la señal procesada en MATLAB no estuviera afectada por desajustes en la adquisición de datos.

Aplicando el filtro pasa banda Butterworth de segundo orden mencionado anteriormente, con frecuencias de corte entre 38 kHz y 42 kHz, se filtró la señal en tiempo real dentro del entorno de LabVIEW. El objetivo fue comparar los datos obtenidos tras el filtrado previo con aquellos procesados posteriormente en MATLAB, determinando si la aplicación temprana del filtro mejoraba la relación señal-ruido y la estabilidad de la imagen.

En el programa de prueba, se visualizó la señal sinusoidal generada por la retroalimentación óptica, observándose un pico dominante a 40 kHz, correspondiente a la frecuencia de operación del transductor ultrasónico en datos brutos. La implementación del filtro en LabVIEW permitió reducir componentes de ruido antes de la adquisición, asegurando una mayor fidelidad en la representación de la señal ultrasónica al lado derecho de la siguiente figura.

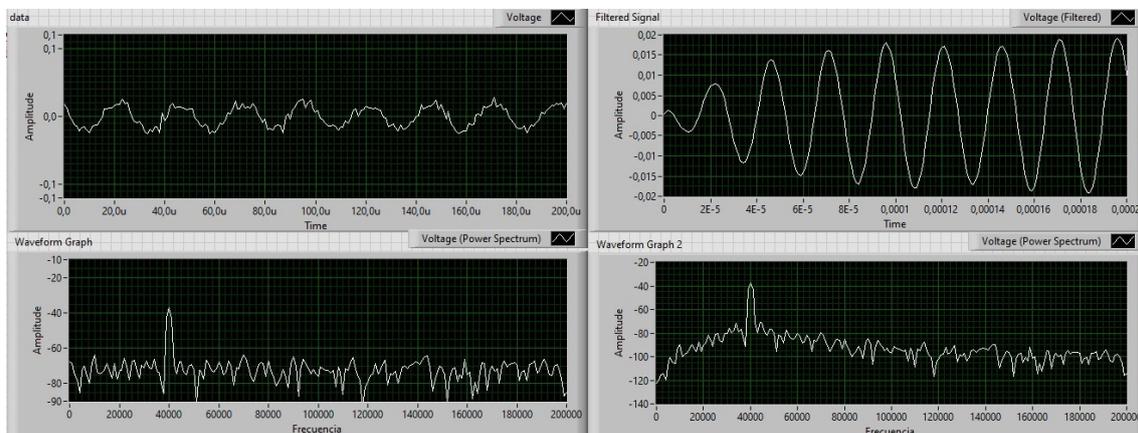


Figura 2.77: Implementación de filtros en prueba de sincronización

- **Modificación del interfaz Arduino-LabView**

Dado que el filtro pasa banda Butterworth de segundo orden, implementado en la prueba de sincronización, mostró una mejora significativa en la calidad de la señal, se decidió incorporarlo en el programa principal de secuencia de muestreo. Con esta modificación, los datos adquiridos por la DAQ ya no se manejarán en su forma bruta, sino que serán procesados en tiempo real antes de su almacenamiento y análisis. Sin embargo, los datos sin filtrar también serán conservados en paralelo para fines comparativos y de validación.

Estos ajustes fueron realizados en el séptimo frame del programa, correspondiente al procesamiento de los datos adquiridos por el sistema DAQ. En esta etapa, se integró el filtro en la interfaz Arduino-LabVIEW, asegurando que la señal almacenada y visualizada en el centro de control ya haya sido optimizada. Para facilitar esta gestión, se incorporó un bloque adicional de "Write to Measurement", que permite registrar tanto la señal filtrada como la original, garantizando así una supervisión detallada del comportamiento de la onda ultrasónica durante la ejecución del experimento.

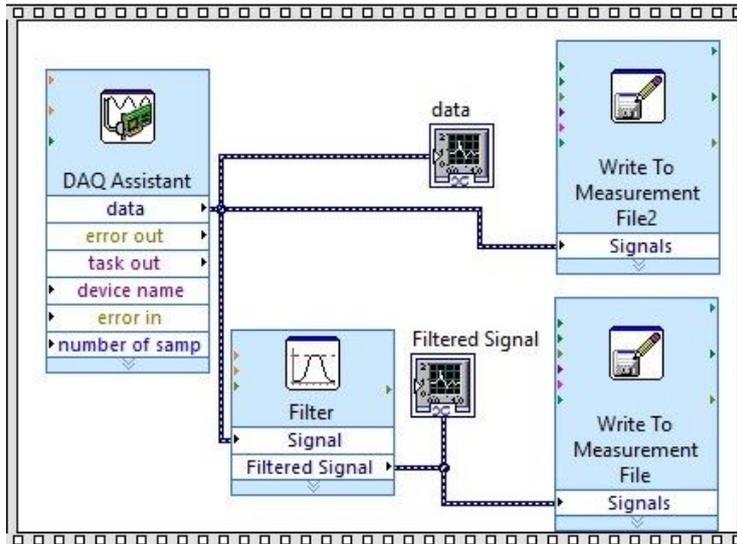


Figura 2.78: Colocación de filtro para Bloque Write to Measurement adicional

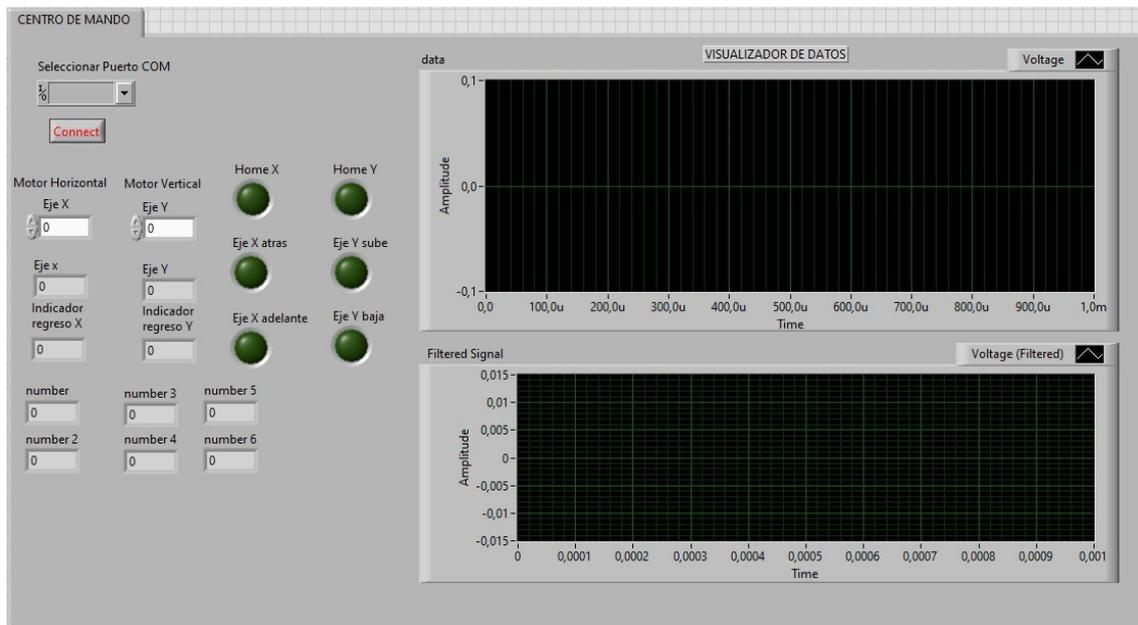


Figura 2.79: Centro de Control con visualizador de señal filtrada

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS Y RESULTADOS

3.1 Imágenes de detección Óptoacústica

Las pruebas iniciales de procesamiento de datos e imágenes se orientan a determinar la región de interés (ROI) que el diodo láser escanea durante su secuencia de muestreo. El objetivo principal es definir las dimensiones óptimas que permitan una visualización precisa del fenómeno y faciliten un análisis comparativo. Estas pruebas y calibraciones se llevan a cabo en ausencia de un campo eléctrico, con el fin de ajustar la configuración del sistema de manera segura.

Se evalúan cinco configuraciones distintas, en las cuales el tamaño de la ROI varía progresivamente de menor a mayor. A medida que el área de muestreo aumenta, la cantidad de datos adquiridos también se incrementa. El número total de píxeles en la imagen obtenida es proporcional al producto de las dimensiones de la ROI (ancho \times altura). Adicionalmente, dado que cada píxel contiene 1000 datos, eso configurado en la DAQ por cada barrido horizontal que realiza el diodo láser, establecido así con el fin de mejorar la resolución de las imágenes, la cantidad total de información registrada en cada configuración se calcula multiplicando el número de píxeles por esta cantidad de datos.

Tabla 3.1: Dimensión de la Región de Interés y Cantidad de Datos Adquiridos

ROI (mm)	Datos Adquiridos
10×10	100,000
20×20	400,000
30×30	900,000
40×40	1,600,000
50×50	2,500,000

No se realizaron muestreos mayores, debido a que un área más amplia implicaba un recorrido vertical del láser que excedía la brecha entre los electrodos, lo que generaba ciertas limitaciones físicas en la configuración experimental.

A lo largo de estas calibraciones, uno de los hitos más relevantes es la observación del oleaje generado por el transductor ultrasónico, lo que indica que el sistema opera

correctamente y que el proceso avanza en la dirección prevista. Finalmente, se establece un muestreo de 50×50 mm, debido a que el incremento en la cantidad de datos mejora significativamente la visualización del patrón de ondas, lo que permite un análisis más detallado del fenómeno.

3.2 Construcción de la Imagen Bidimensional de la Propagación de Ondas Ultrasónicas

Para analizar la propagación de ondas ultrasónicas en el plano X - Y se generaron imágenes bidimensionales a partir de los datos adquiridos y procesados. Este procedimiento incluyó el análisis en el dominio del tiempo y la obtención del espectro de frecuencia de cada punto medido, permitiendo la representación detallada del fenómeno.

3.2.1 Procesamiento de Datos y Generación de la Imagen en el Dominio del Tiempo

Los datos adquiridos fueron almacenados en archivos de formato .LVM y posteriormente procesados en MATLAB. La región de interés (ROI) se definió con una resolución de 50×50 mm, lo que resultó en una matriz de 2.500 píxeles. Cada píxel conformada por 1.000 datos correspondientes a la señal ultrasónica en el dominio del tiempo.

Una vez obtenidos los datos correspondientes a cada píxel de la resolución establecida, se generaron las imágenes en el dominio del tiempo, donde se observó la señal sinusoidal resultante de la propagación de la onda ultrasónica detectada por el diodo láser en un píxel seleccionado aleatoriamente. Posteriormente, al procesar la totalidad de los píxeles en el dominio temporal, se construyó una representación bidimensional de la propagación de las ondas ultrasónicas en el ensayo realizado, permitiendo analizar su comportamiento espacial y las variaciones en la amplitud y fase de la señal a lo largo del área de estudio.

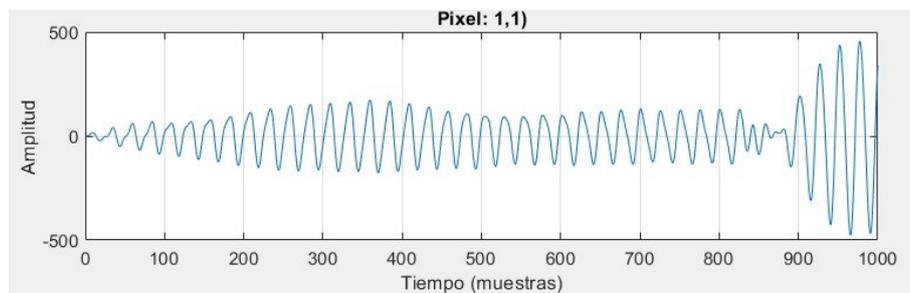


Figura 3.1: Imagen en dominio del tiempo de un píxel aleatorio

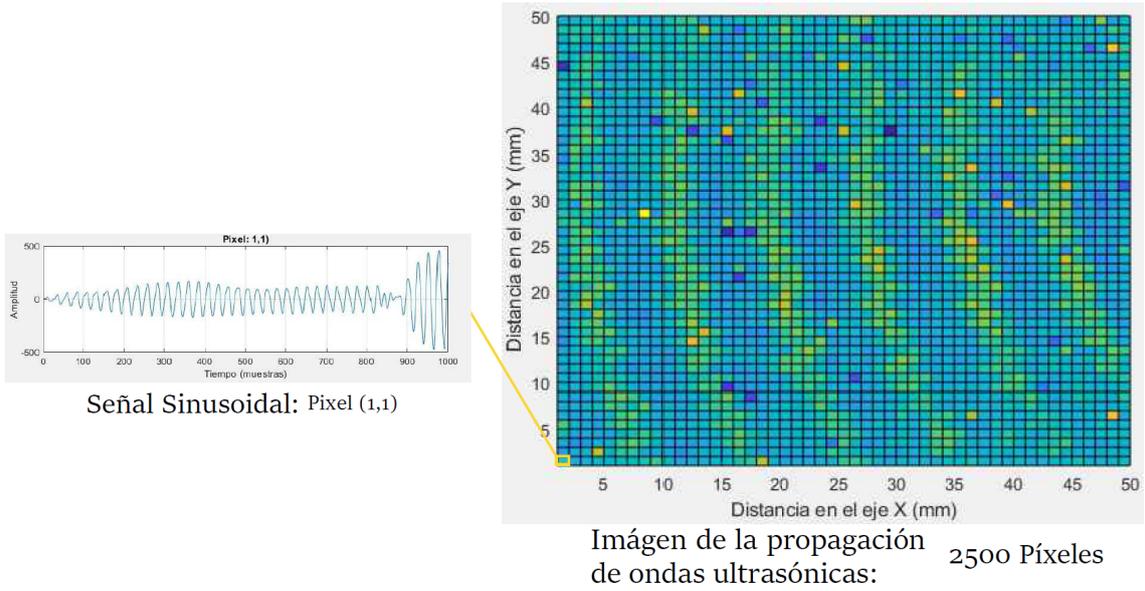


Figura 3.2: Análisis Sinusoidal del Pixel 1

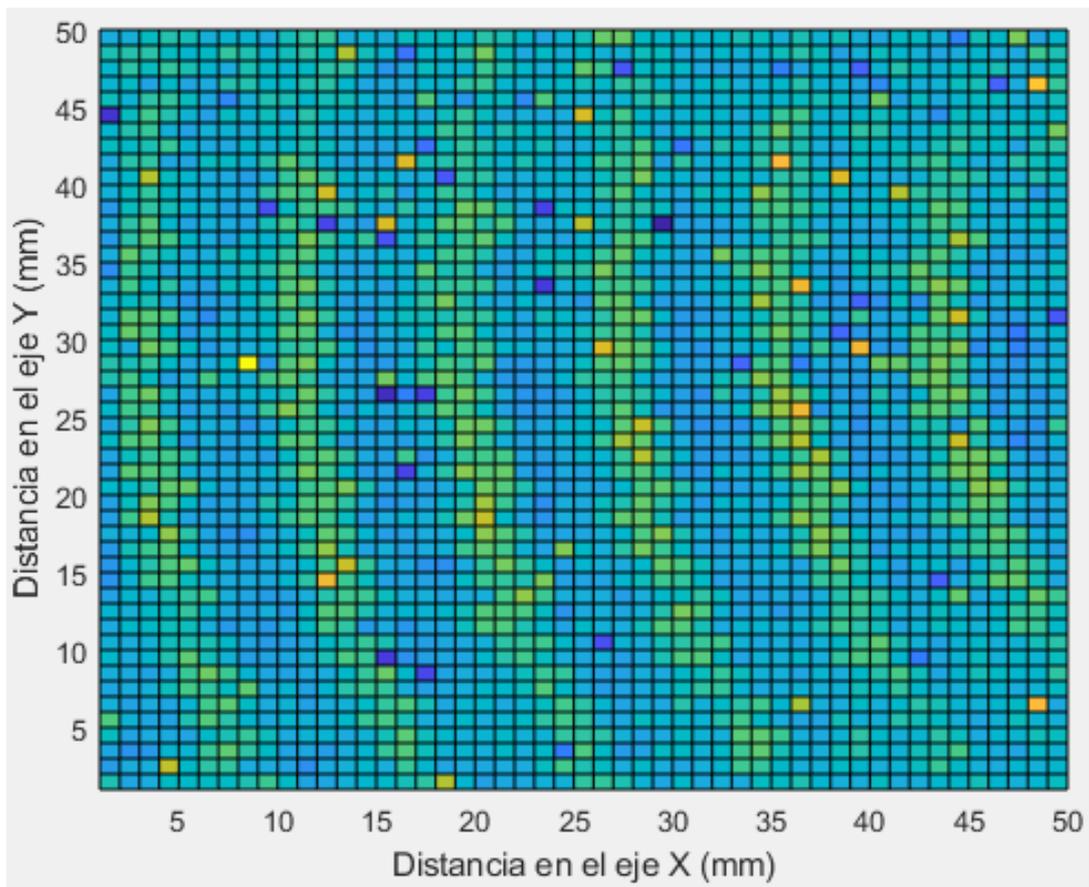


Figura 3.3: Imágen de la Propagación de Ondas Ultrasónicas en 2D

3.2.2 Transformada Rápida de Fourier y Construcción de la Imagen Espectral

Para complementar el análisis en el dominio del tiempo, se aplicó la Transformada Rápida de Fourier (FFT) a cada uno de los píxeles, permitiendo obtener el espectro de frecuencia de la señal en cada punto. La FFT es una herramienta matemática que convierte una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, lo que facilita la identificación de los componentes espectrales de la onda ultrasónica. En este caso, la FFT se utilizó para extraer las frecuencias relevantes que describen la propagación de las ondas ultrasónicas en la imagen espectral.

La FFT de una señal $x(n)$ de longitud N se define como [56]:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi kn/N} \quad (3.1)$$

donde:

$X(k)$ es la representación espectral de la señal en la frecuencia k .

$x(n)$ es la señal en el dominio del tiempo.

N es la cantidad total de muestras.

j es la unidad imaginaria ($j^2 = -1$).

$e^{-j2\pi kn/N}$ representa la base ortogonal de la transformación.

El código en MatLab realiza la siguiente operación para cada píxel:

- Frecuencia de muestreo: $f_s = 1000000$ Hz.
- Longitud de la señal: $L = 1000$ muestras.
- Señal temporal: $q(\cdot) = \text{arraydatafilter}(i, j, \cdot)$, que representa la señal de cada píxel en la imagen filtrada.
- Número total de muestras: $N = 1000$, que es igual a L .
- Índice de frecuencia: k , que varía dependiendo de la frecuencia deseada en la transformada de Fourier.
- Periodo de muestreo: $T = \frac{1}{f_s} = 1 \times 10^{-6}$ s.

Al calcular la FFT para cada uno de los 2.500 píxeles, se obtuvo la distribución espectral en el espacio, permitiendo la construcción de la imagen del máximo espectral de la propagación de la onda ultrasónica. Esta imagen representa la presión acústica en función de la frecuencia, proporcionando una descripción detallada de la interacción de la onda con el medio y las posibles alteraciones inducidas por el campo eléctrico aplicado.

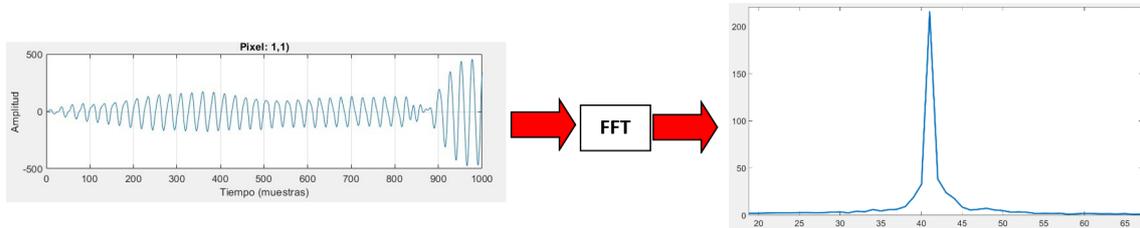


Figura 3.4: Dominio de tiempo a Espectro de frecuencia

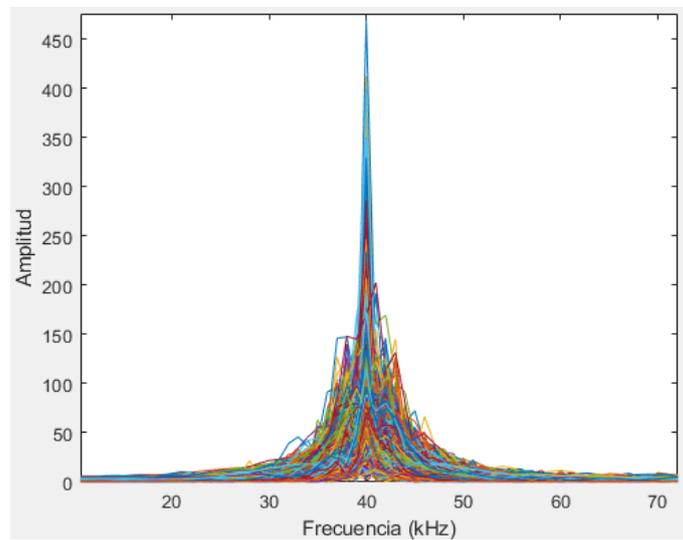


Figura 3.5: Máximo Espectral

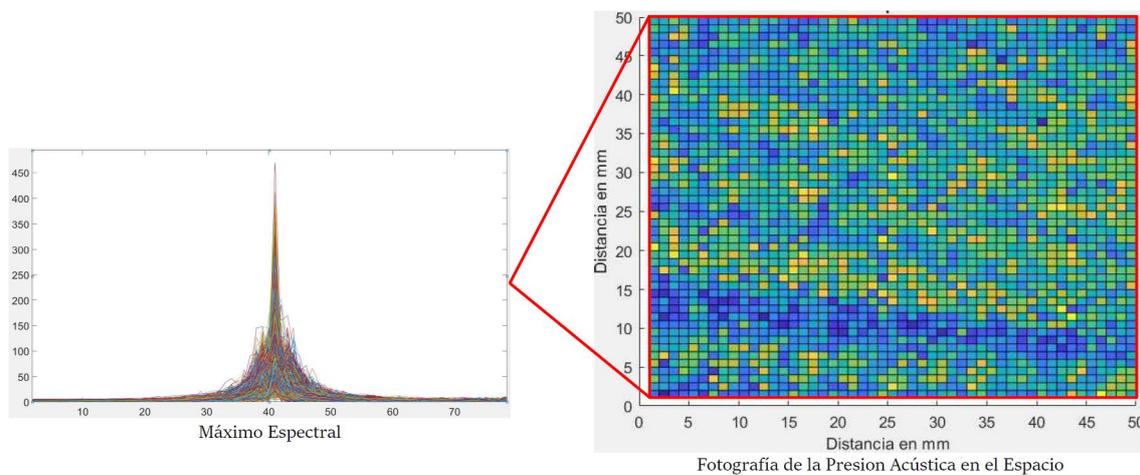


Figura 3.6: Máximo Espectral de la imagen de Presión Acústica

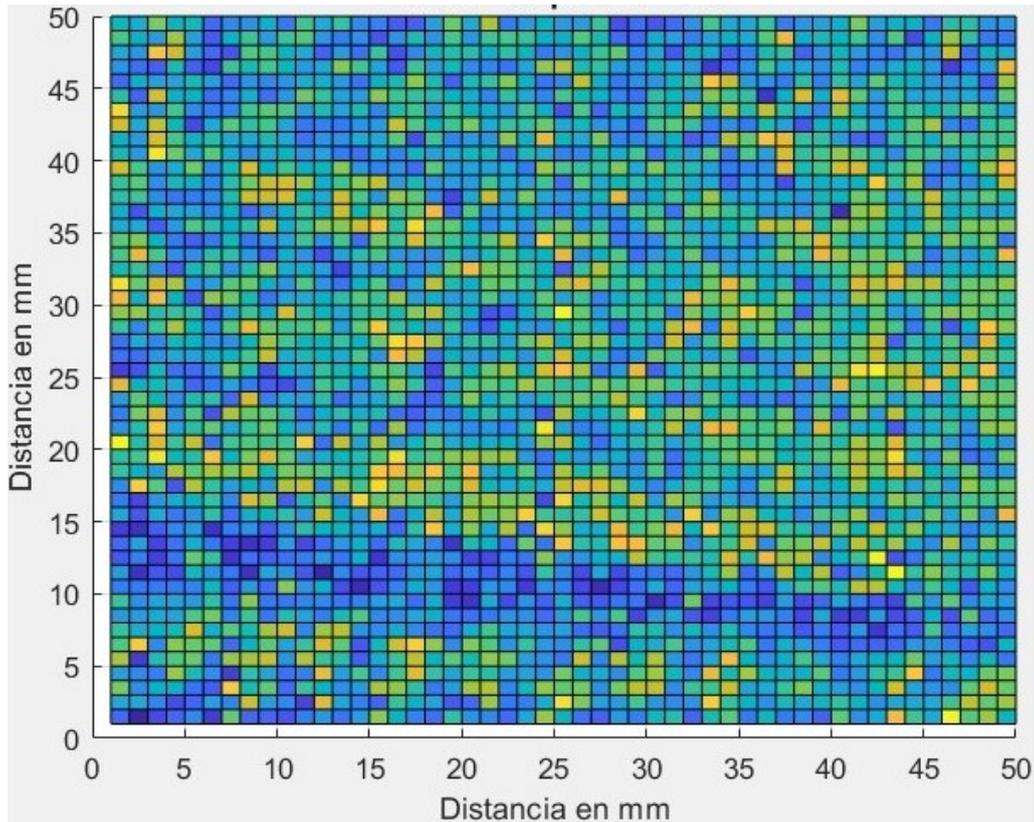


Figura 3.7: Presión Acústica en el Espacio

3.2.3 Cálculo Longitud de Onda

A partir de la imagen bidimensional obtenida previamente, se procedió a determinar la longitud de onda de la señal ultrasónica utilizada en el experimento. Para ello, se identificaron las regiones de máxima y mínima amplitud dentro de la representación espacial de la propagación de la onda. Posteriormente, se midió la distancia entre dos crestas consecutivas de la señal, permitiendo calcular la longitud de onda.

$$v = f \cdot \lambda \quad (3.2)$$

Datos considerados:

- Velocidad de propagación del sonido en aire: $v = 350$ m/s.
- Frecuencia de la señal ultrasónica: $f = 40000$ Hz.

Despejando λ de la ecuación y sustituyendo los valores:

$$\lambda = \frac{350000\text{cm/s}}{40000\text{Hz}} = 8.75 \text{ mm} \quad (3.3)$$

Llegamos a conclusión, que la longitud de onda de la señal ultrasónica utilizada en el experimento es de 8.75 mm tal como se ilustra en la siguiente figura.

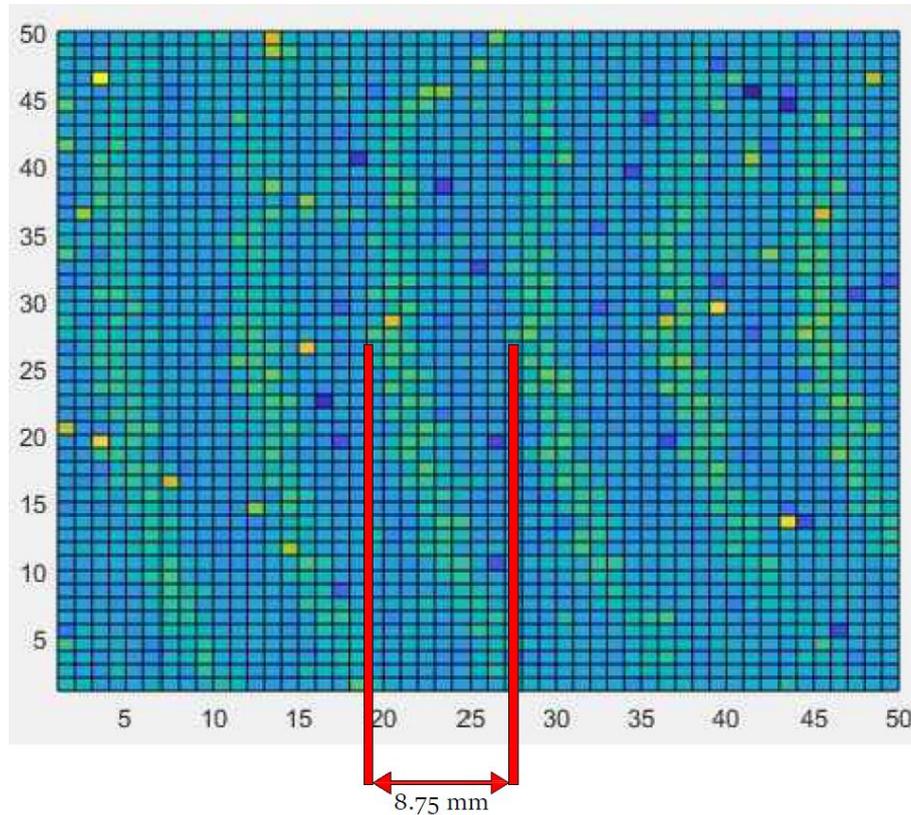


Figura 3.8: Longitud de Onda

En la imagen bidimensional se observa que la distancia entre las barras seleccionadas presenta una correspondencia cercana con la distancia calculada teóricamente. Esta relación también se mantiene en las demás barras dentro de la imagen, lo que sugiere una representación consistente de los datos obtenidos.

Sin embargo, la precisión en la determinación de estas distancias puede estar condicionada por variables ambientales que afectan los parámetros físicos del sistema. Entre estos factores se encuentra la velocidad del sonido, cuyo valor nominal de 350,000 cm/s puede experimentar variaciones debido a condiciones del medio como temperatura, humedad y presión atmosférica. Dichas variaciones pueden modificar la densidad del medio de propagación, afectando la velocidad de las ondas ultrasónicas y, por ende, introduciendo discrepancias entre los valores medidos y los calculados teóricamente.

3.3 Fase de Pruebas

- **Primera Fase: Campo Eléctrico Intenso en Corriente Continua**

En esta fase, se aplicó un campo eléctrico intenso en CC, manteniendo la tensión por debajo del umbral de ruptura dieléctrica.

- Segunda Fase: Campo Eléctrico Intenso en Corriente Alterna
- Tercera Fase: Campo Eléctrico Intenso en Condiciones de Ruptura
En la última fase, se incrementó la tensión hasta alcanzar la ruptura dieléctrica, generando arco eléctrico tanto en CC como en CA.

Características de Ensayo

Tabla 3.2: Tensiones aplicadas en los ensayos

Situación	Tipo	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5
Fase 1	kV	1	10	20	30	40
Fase 2	kV	2	11	20	30	33
Fase 3	kV	62	65	-	-	-

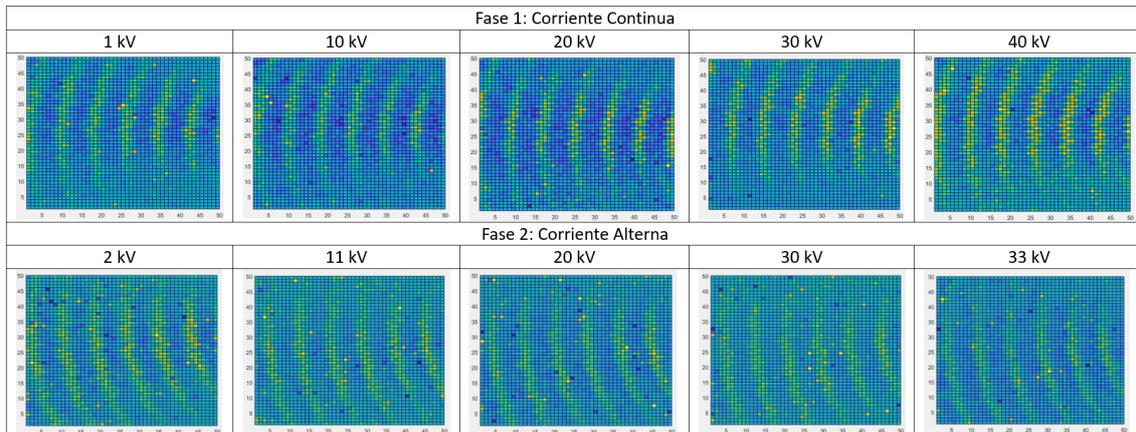


Figura 3.9: Imágenes Bidimensionales Fase 1 y 2

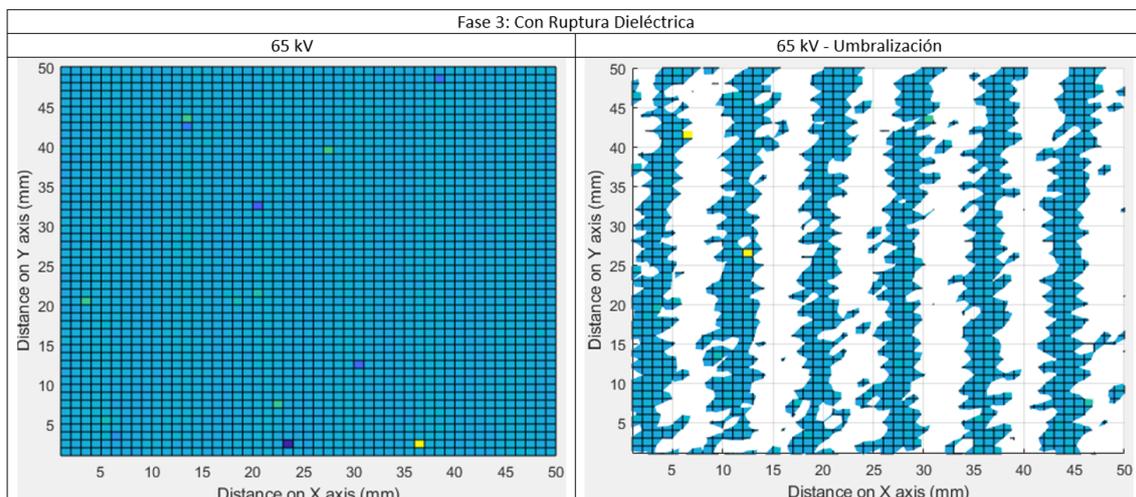


Figura 3.10: Imágenes Bidimensionales Fase 3 - Umbralización

3.3.1 Contorno de nivel de la Onda

El contorno de nivel es una técnica utilizada en análisis de imágenes que permite representar regiones con valores constantes de una magnitud específica, como la amplitud de una onda. En el contexto de la propagación de ondas ultrasónicas, esta técnica se emplea para identificar y visualizar zonas de la onda que tienen la misma intensidad, facilitando la interpretación y el estudio de las características de la onda en diferentes puntos del espacio [57].

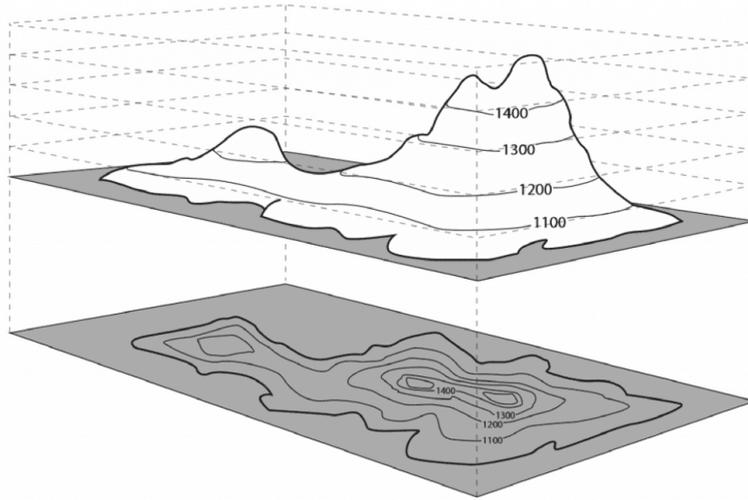


Figura 3.11: Ejemplo Contorno de Nivel

El uso de contornos de nivel en la imagen bidimensional obtenida de la propagación de ondas ultrasónicas tiene como propósito resaltar las regiones de interés donde la amplitud de la onda se mantiene constante.

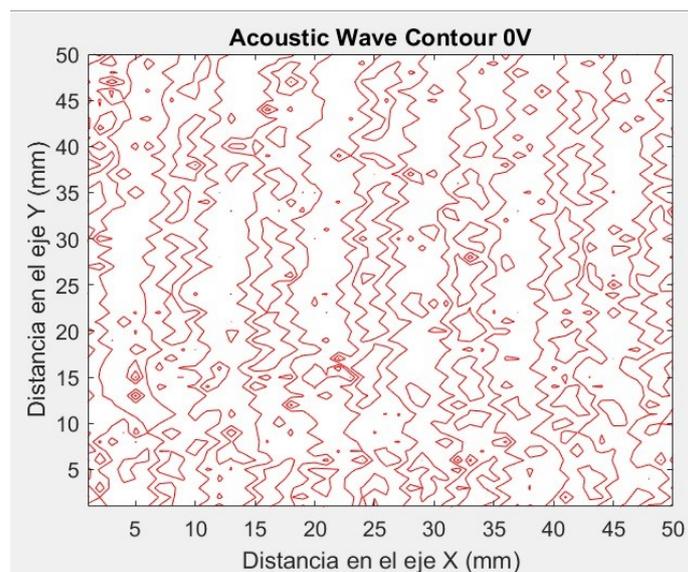


Figura 3.12: Contorno de Nivel a la imagen bidimensional de propagación de ondas ultrasónicas en la ROI

En la imagen de propagación de ondas ultrasónicas, los contornos de nivel permiten visualizar las regiones donde la amplitud de la onda tiene valores similares. Sin embargo, los espacios en blanco indican que la onda ha sido seccionada en ese nivel, es decir, que no toda la información de la propagación está representada simultáneamente. Esto se debe a que la técnica utilizada muestra únicamente los contornos correspondientes a ciertas magnitudes, dejando fuera otras partes de la onda que no coinciden con estos niveles específicos.

3.4 Comparación de Imágenes 2D

La Figura 3.13 muestra dos mapas de contorno que representan la distribución de una onda acústica en función de la distancia en los ejes X e Y. La figura de la izquierda corresponde a una condición de 0V, mientras que la de la derecha muestra la misma onda bajo la influencia de un potencial de 65 kV. Los contornos en rojo indican regiones de igual amplitud de la onda en cada punto del espacio analizado.

En la primera imagen (0V), los contornos presentan una distribución más irregular y dispersa, con variaciones significativas en su forma y tamaño. Esto sugiere la presencia de interferencias en la propagación de la onda acústica, probablemente debido a efectos de reflexión y difracción sin una dirección predominante. La alta densidad de contornos refleja múltiples fluctuaciones en la amplitud de la onda a lo largo del espacio, lo que indica una propagación menos uniforme.

En contraste, en la imagen correspondiente a 65 kV, los contornos exhiben una distribución más regular y organizada. Las líneas de igual amplitud tienden a alinearse de manera más paralela en comparación con la primera imagen, lo que sugiere que la aplicación del campo eléctrico ha inducido un efecto de alineación en la propagación de la onda. Esto ha reducido la dispersión y la interferencia, favoreciendo una mayor estabilidad en la onda. Además, la disminución de contornos pequeños indica un entorno más homogéneo o una modificación en la interacción de la onda con el medio.

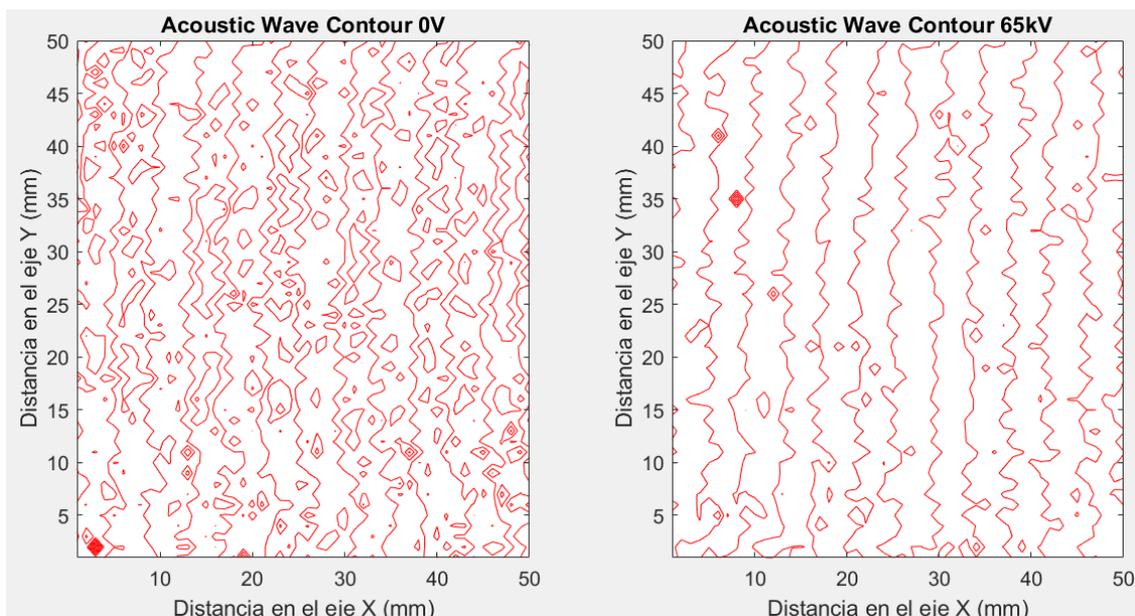


Figura 3.13: Contorno de nivel en 0 V y 65 kV

La Figura 3.14 presenta dos gráficos tridimensionales que ilustran la distribución espacial de una señal en dos condiciones distintas: sin voltaje de alta tensión (0 V) y con la aplicación de 65 kV. En ambos casos, se observan variaciones en la amplitud, lo que indica la presencia de fluctuaciones en la señal medida.

En el gráfico "0 V", la superficie exhibe variaciones en la amplitud, con picos resaltados en colores más claros (amarillo y negro), que representan los valores máximos locales. La distribución general de la señal muestra una textura rugosa, sugiriendo una alta variabilidad en la medición.

Por otro lado, en el gráfico "65 kV-AC", la estructura es similar, aunque se aprecian diferencias en la intensidad y distribución de los picos. La amplitud general de la señal parece haber aumentado, con picos más pronunciados o redistribuidos en comparación con la condición sin tensión aplicada.

Este comportamiento podría estar relacionado con la influencia de la alta tensión en la señal medida. Factores como la interferencia electromagnética (EMI) generada por el campo eléctrico aplicado, la ionización del aire circundante (efecto corona) o cambios en la impedancia del sistema de medición pueden afectar la distribución espacial de la señal. Además, el aumento en la variabilidad de la señal bajo la condición de 65 kVAC sugiere la presencia de ruido adicional inducido por la alta tensión.

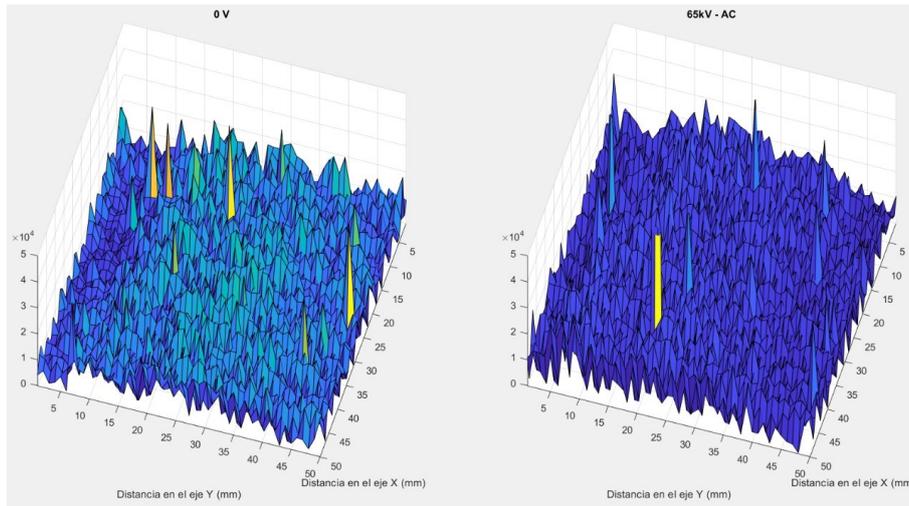


Figura 3.14: Imagen tridimensional de la propagación de ondas ultrasónicas

Como se sabe, la longitud de onda es de 8.75 mm, como se muestra en la Ecuación 3.3. En la Figura 3.15, se observa que la imagen de referencia, correspondiente a la condición sin voltaje (0 kV), presenta una forma ovalada, mientras que la imagen obtenida con 65 kV exhibe una onda más plana.

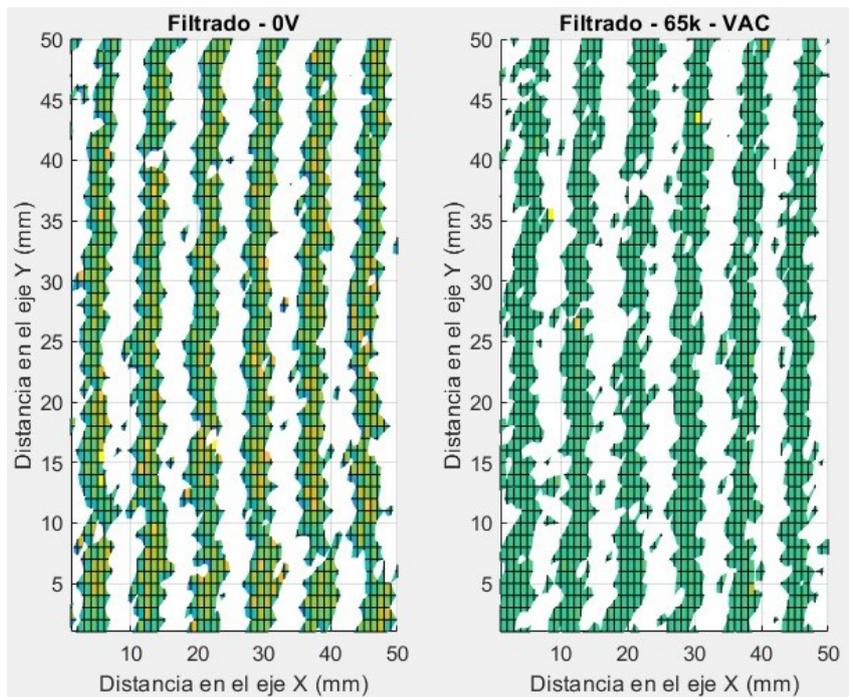


Figura 3.15: Visualización del frente de onda

Esta diferencia resulta de gran interés para el análisis, ya que la aplicación de un voltaje alto puede provocar ionización en el material o en el medio circundante, lo que podría modificar la resistencia mecánica y alterar la propagación de la onda. Este fenómeno podría explicar las variaciones en la forma de la onda observadas en ambas imágenes.

En la Figura 3.16, se presentan dos gráficos de señales filtradas en el dominio del tiempo. Ambas señales exhiben una oscilación cuya amplitud varía a lo largo del tiempo, aunque con diferencias notables entre las dos condiciones de prueba. Estas imágenes representan la señal senoidal dentro de un píxel.

El primer gráfico muestra la señal cuando no se aplica voltaje de alta tensión (0 V), mientras que el segundo corresponde a la misma señal medida bajo la aplicación de 65 kV de tensión alterna. El análisis de estas señales permite evaluar el impacto de la alta tensión en el sistema de medición y sus posibles efectos en la señal adquirida.

Ambas señales comparten una característica común: su amplitud inicial es relativamente baja y aumenta progresivamente hasta alcanzar un estado estacionario. Este comportamiento sugiere la presencia de un fenómeno transitorio antes de la estabilización. Sin embargo, al comparar ambas señales, se observa que la amplitud de la señal medida a 65 kV es menor que la registrada en ausencia de tensión. Esta diferencia indica que la alta tensión influye directamente en la magnitud de la señal oscilatoria, posiblemente debido a diversos factores físicos y eléctricos.

Uno de los posibles factores que explican esta diferencia es la interferencia electromagnética (EMI). La presencia de un campo eléctrico intenso generado por la alta tensión podría afectar los sensores o el sistema de medición, induciendo cambios en la amplitud de la señal. Otro aspecto a considerar es el efecto corona, un fenómeno típico en sistemas de alta tensión en el que el aire circundante se ioniza, generando descargas parciales que pueden influir en la respuesta del sistema.

Además, la variación de la impedancia en el circuito de medición debido a la alta tensión podría alterar la respuesta del sensor o del medio donde se propaga la señal, reduciendo su amplitud. También es posible que la aplicación de 65 kV provoque pérdidas dieléctricas en el sistema, afectando la transmisión y adquisición de la señal medida.

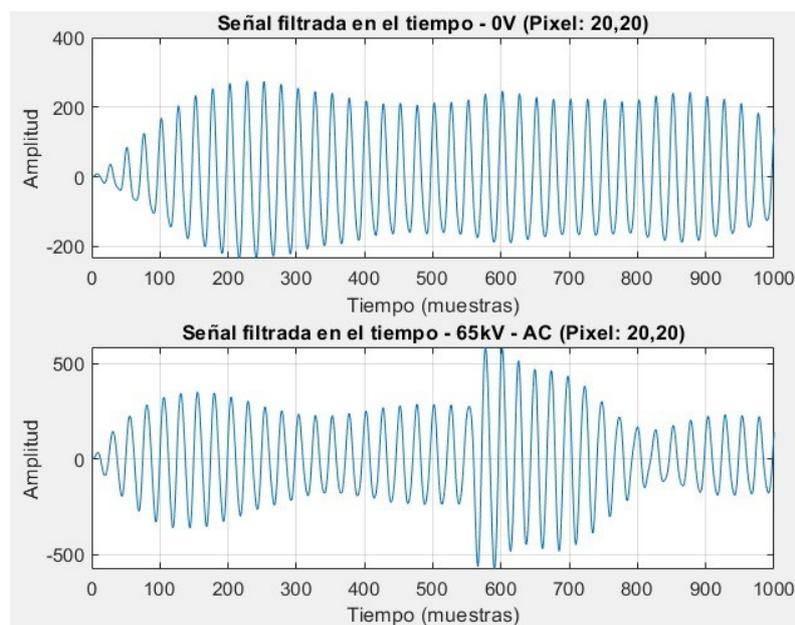


Figura 3.16: Señal Senoidal de un píxel aleatorio

Por otro lado, el análisis de la diferencia entre ambas señales se muestra en la Figura 3.17, donde se observa lo siguiente: las áreas blancas representan regiones sin cambios significativos entre las dos condiciones, mientras que las zonas coloreadas indican variaciones en la señal. La distribución de estas diferencias no es uniforme, lo que sugiere que el efecto de la tensión aplicada varía en distintas partes del área analizada.

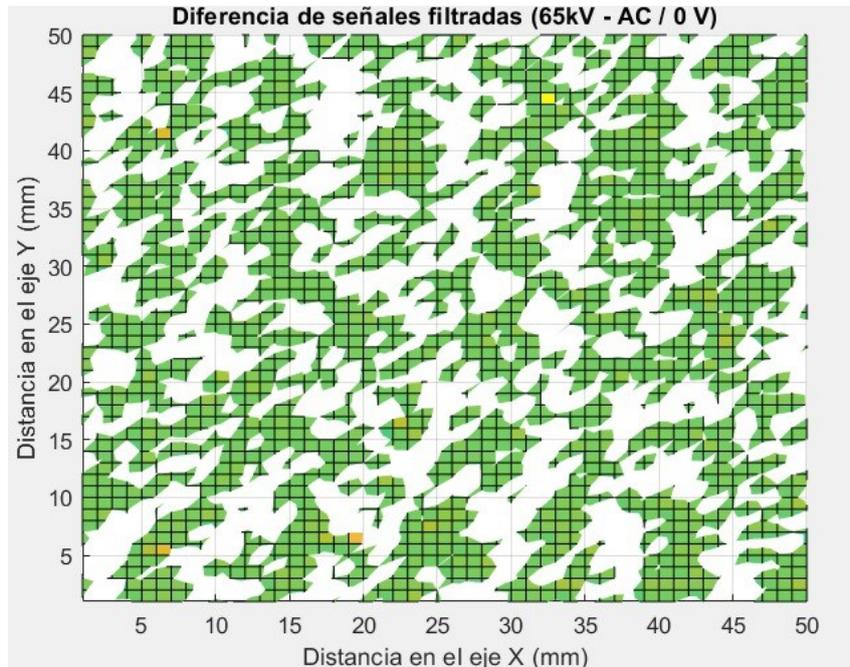


Figura 3.17: Diferencia de las señales filtradas

Realizando la Transformada de Fourier de cada pixel de la imagen se obtiene la figura 3.18 y su presión acústica en la figura 3.19.

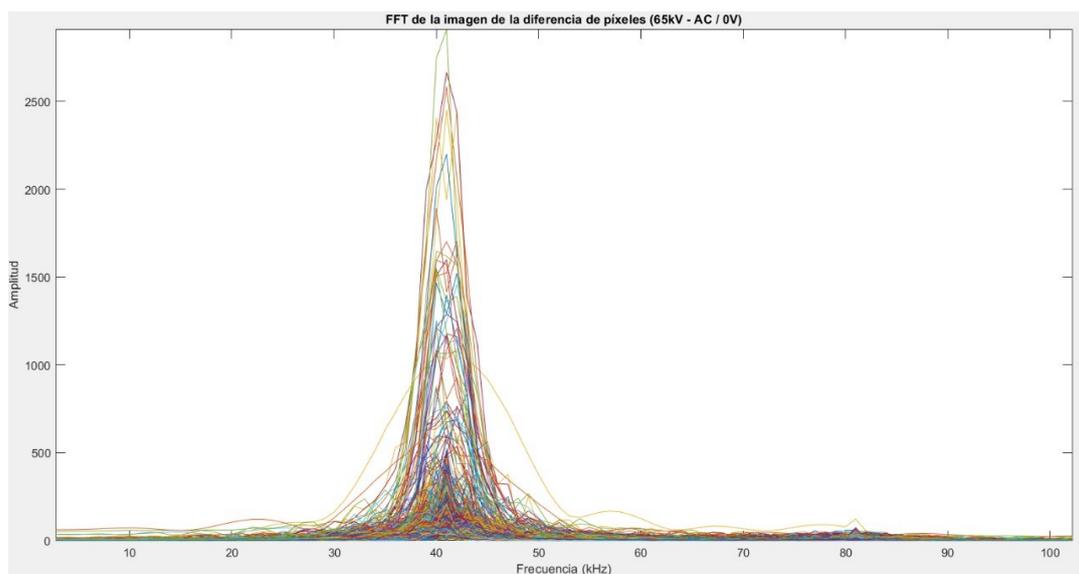


Figura 3.18: FFT de la diferencia de las señales

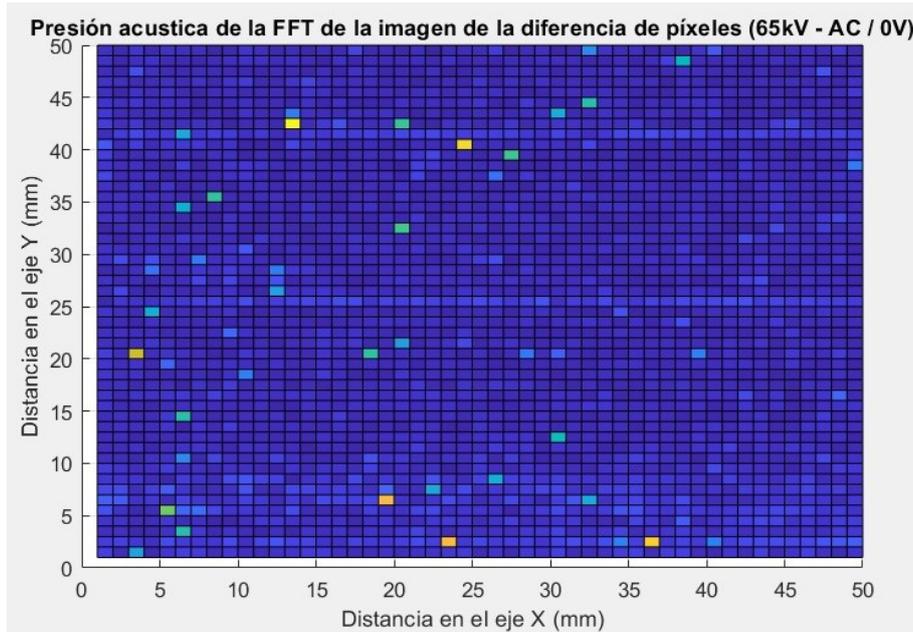


Figura 3.19: Presión acústica de la FFT de la diferencia de las señales.

La Figura 3.20 presenta tres gráficos espectrales de señales bajo diferentes condiciones de voltaje, obtenidos mediante un análisis en el dominio de la frecuencia utilizando la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Este análisis permite evaluar el comportamiento espectral de las señales medidas en dos escenarios: sin voltaje de alta tensión (0 V) y con la aplicación de 65 kV. Además, se incluye un gráfico que representa la diferencia espectral entre ambas condiciones.

Cada gráfico muestra la magnitud espectral de las señales analizadas. En el primer gráfico, "FFT - 0V", se observa un pico dominante en una frecuencia específica, acompañado de otros componentes espectrales de menor magnitud reflejada en la Figura 3.20. En el segundo gráfico, "FFT - 65kV", la distribución espectral es similar, aunque con una mayor amplitud en la respuesta. Finalmente, el tercer gráfico, "FFT de la Diferencia Espectral (65kV - 0V)", permite identificar cómo la alta tensión ha modificado la respuesta en frecuencia del sistema analizado.

La presencia de un pico predominante en los tres gráficos sugiere que la señal analizada tiene un componente fundamental bien definido, correspondiente a una frecuencia de operación de 40 kHz. Sin embargo, al comparar los gráficos, se observa que el espectro de la señal con 65 kV presenta una amplitud considerablemente mayor en comparación con la señal a 0 V, lo que indica que la alta tensión ha introducido cambios en la magnitud de la respuesta espectral.

El tercer gráfico, que muestra la diferencia espectral, refuerza esta observación al evidenciar un aumento significativo en la amplitud en la misma región de frecuencia del pico principal. Este comportamiento podría estar asociado a efectos como la interferencia electromagnética (EMI), ruido inducido o cambios en la impedancia del sistema.

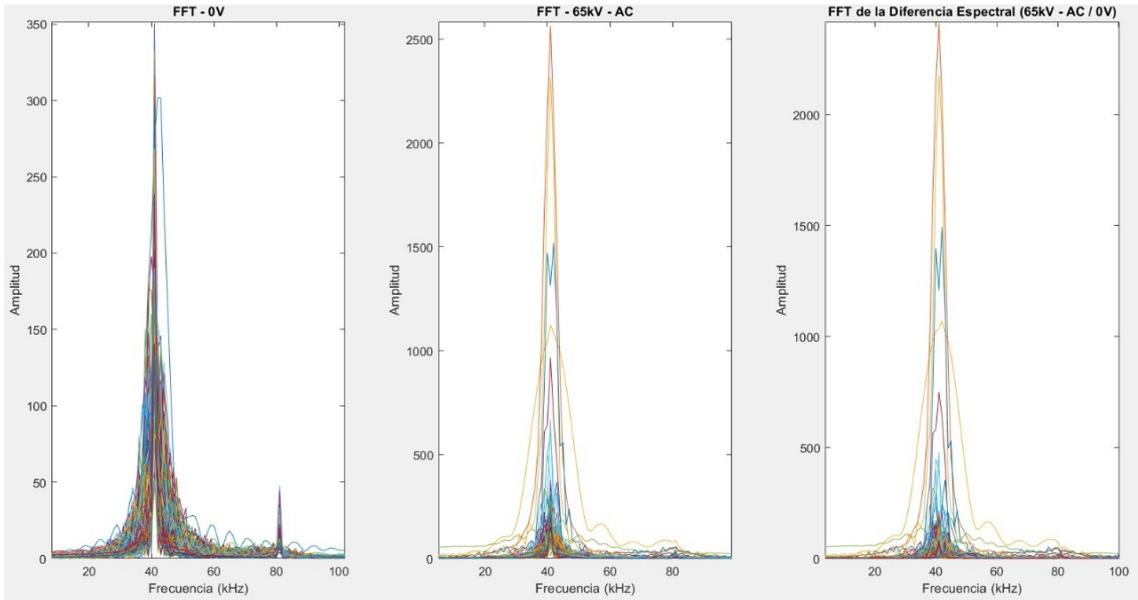


Figura 3.20: Comparación y la diferencia de los FFT de 0V y de 65kV

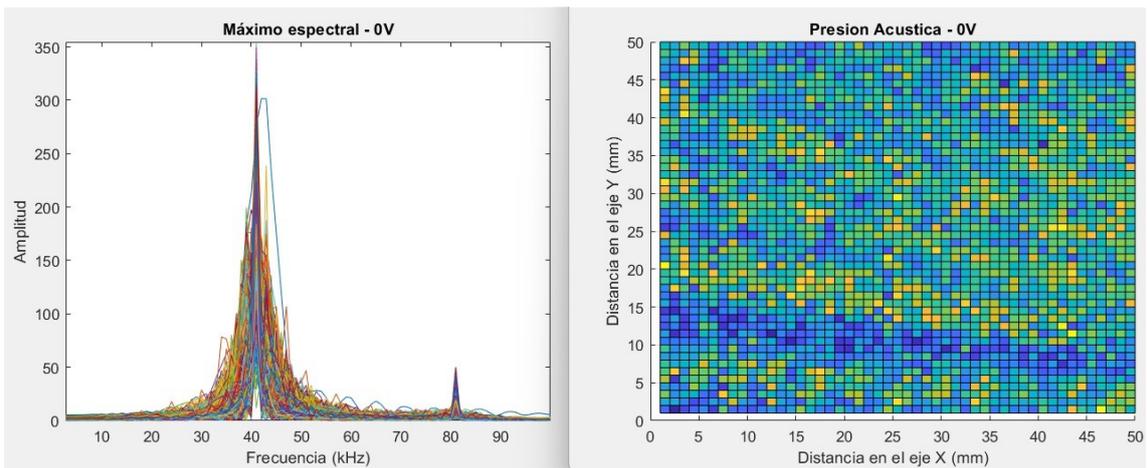


Figura 3.21: FFT y presión acústica de onda de 0V

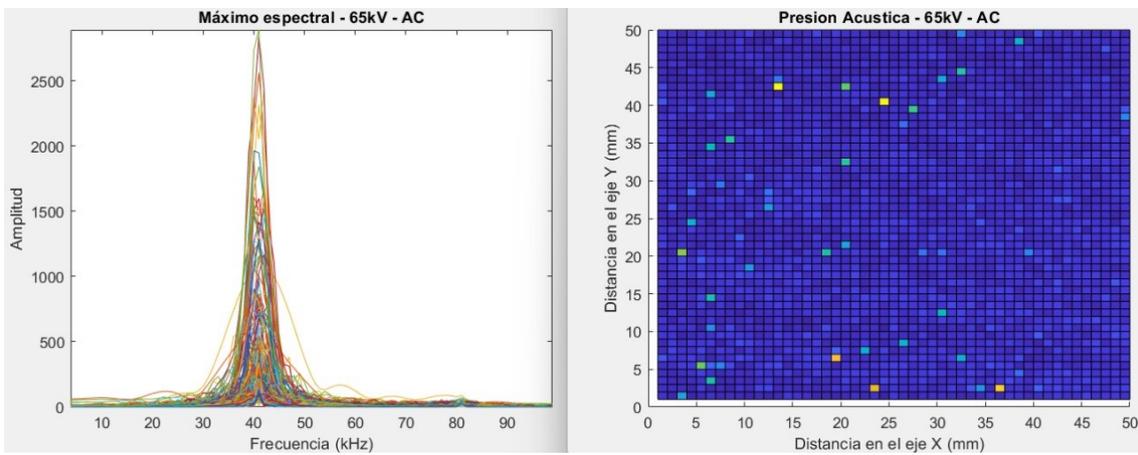


Figura 3.22: FFT y presión acústica de onda de 65kV

A partir de las imágenes de presión acústica, se realizó la diferencia entre ellas, obteniendo como resultado la Figura 3.23. Esta imagen presenta una gran similitud con la Figura 3.22, que corresponde a la presión acústica bajo 65 kV.

Esta similitud se debe a que la amplitud de la FFT de 65 kV es mayor en comparación con la de 0 V, lo que explica la correspondencia observada entre ambas figuras.

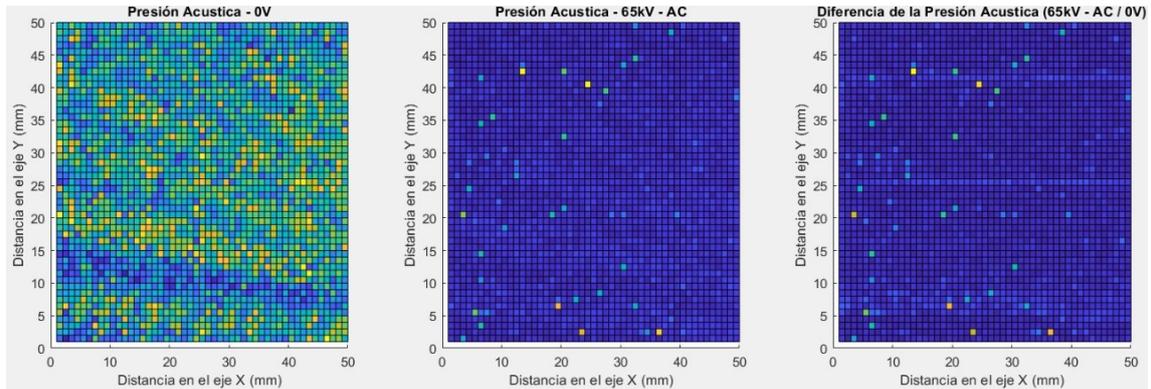


Figura 3.23: Diferencia de la presión acústica

Dado que la resta de las presiones acústicas no mostró diferencias significativas, se procede a realizar una normalización de funciones. Este proceso permite identificar el valor máximo de toda la imagen y, posteriormente, dividir todos los datos por este valor, escalándolos en un rango de 0 a 1.

La normalización se aplica a ambas bases de datos de la onda, tanto en 0 V como en 65 kV, con el objetivo de visualizar de manera más clara las diferencias entre las ondas en ambas condiciones. Este procedimiento se lleva a cabo tanto en las imágenes originales como en las filtradas, generando como resultado las Figuras 3.24 y 3.25.

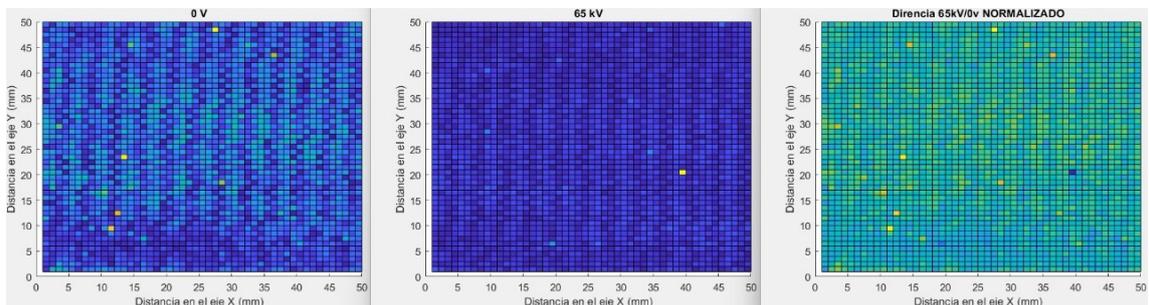


Figura 3.24: Imágenes originales con escala 1

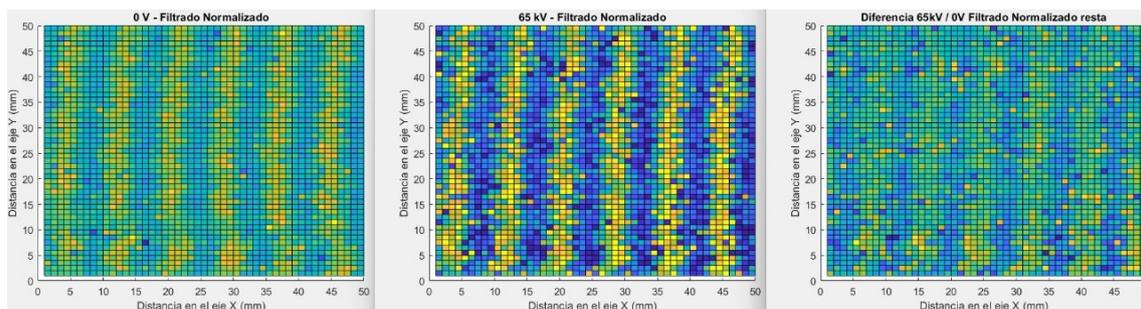


Figura 3.25: Imágenes filtradas con escala 1

En la Figura 3.24 se destaca un paso crucial: la normalización de la imagen basada en un frame, el cual fue utilizado tanto para la imagen guía como para la imagen obtenida con una tensión de 65 kV. En esta última, se eliminaron los valores atípicos, como se muestra en la Figura 3.26, ya que estos afectaban la calidad de la visualización, como se aprecia la figura 3.27.

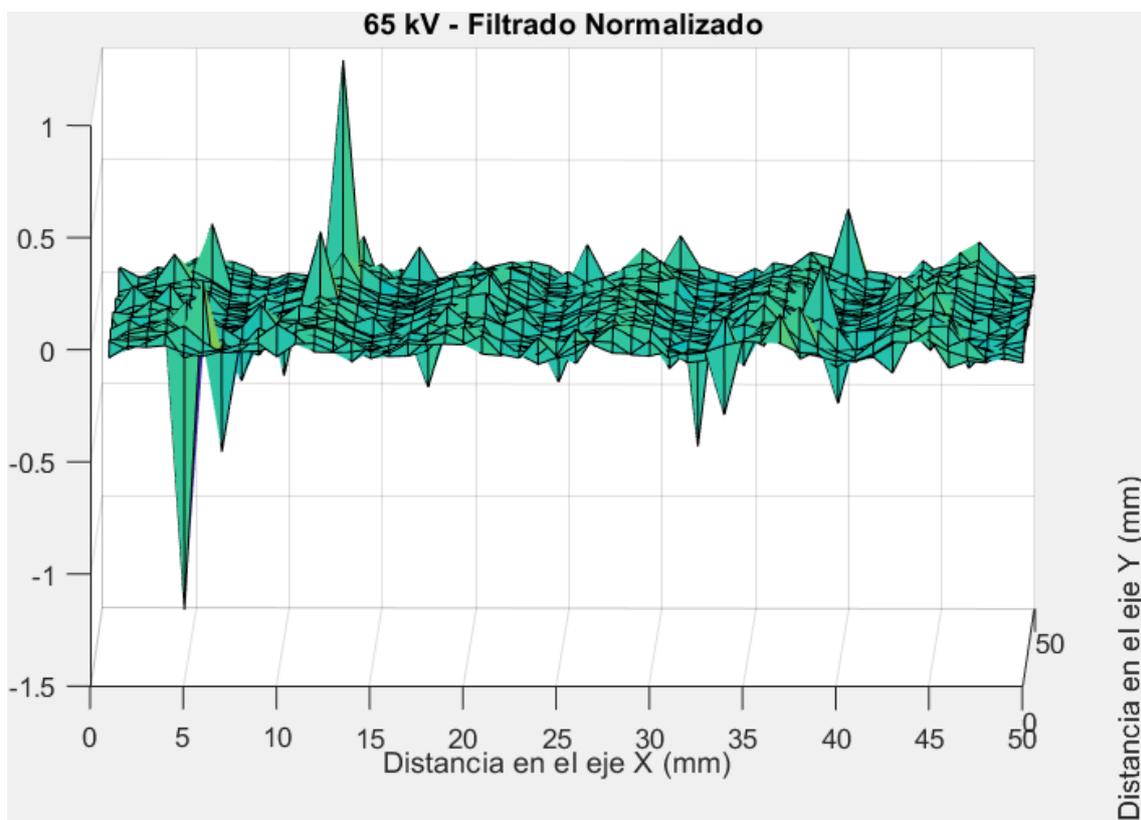


Figura 3.26: Imagen de la onda bajo tensión de 65kV con valores atípicos

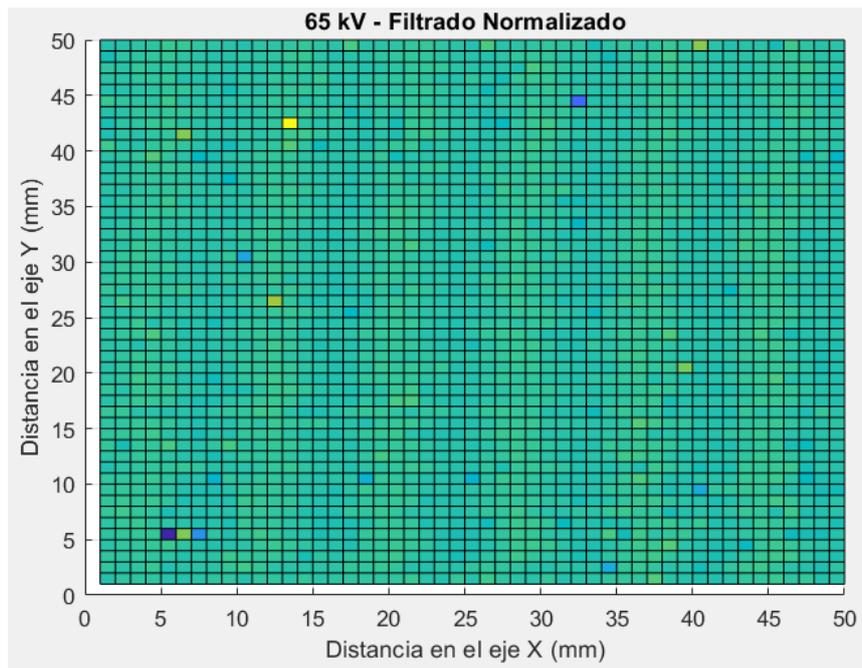


Figura 3.27: Imagen normalizada a escala 1 con poca visibilidad de la onda

Para mejorar la visualización de la onda, se eliminaron los valores atípicos observados en la Figura 3.26. Posteriormente, se realizó una nueva normalización de la imagen utilizando el mismo frame previamente seleccionado. Siguiendo el mismo procedimiento aplicado en la normalización de la imagen a escala 1, se determinó el valor máximo dentro del frame y luego se dividió la imagen por dicho valor. Como resultado, se obtuvo la Figura 3.28, que permite una mejor visibilidad de la onda bajo una tensión de 65 kV.

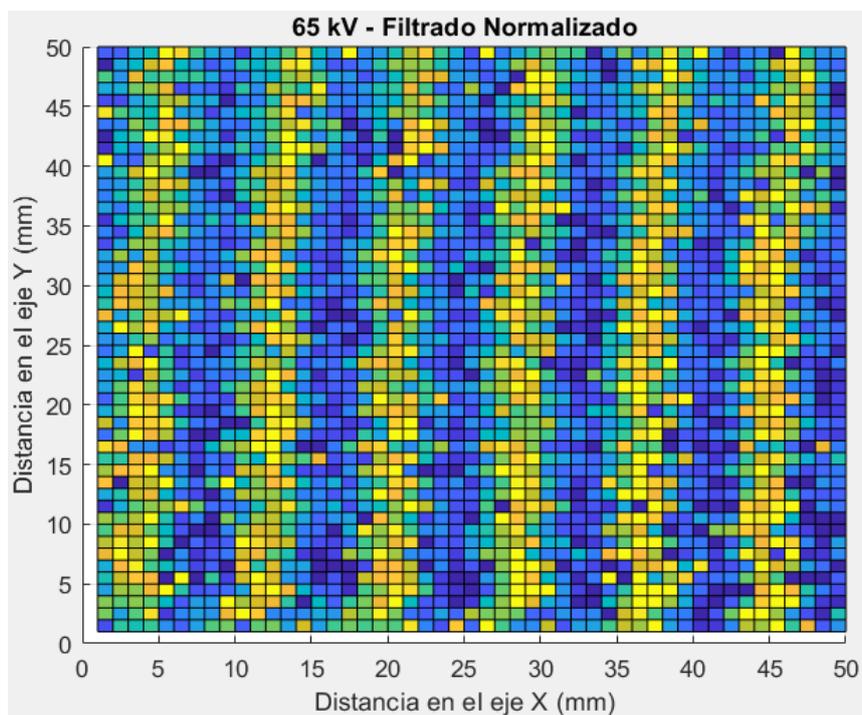


Figura 3.28: Imagen normalizada a escala 1 con mayor visibilidad de la onda

Con una mayor visibilidad de la onda, es posible realizar un análisis tanto de la imagen guía como de la imagen obtenida a 65 kV. Finalmente, se comparan ambas imágenes mediante operaciones de suma y resta para identificar posibles cambios y determinar si la distorsión del medio bajo campos eléctricos intensos es efectivamente visible. El análisis comienza con la imagen guía, representada en la Figura 3.29.

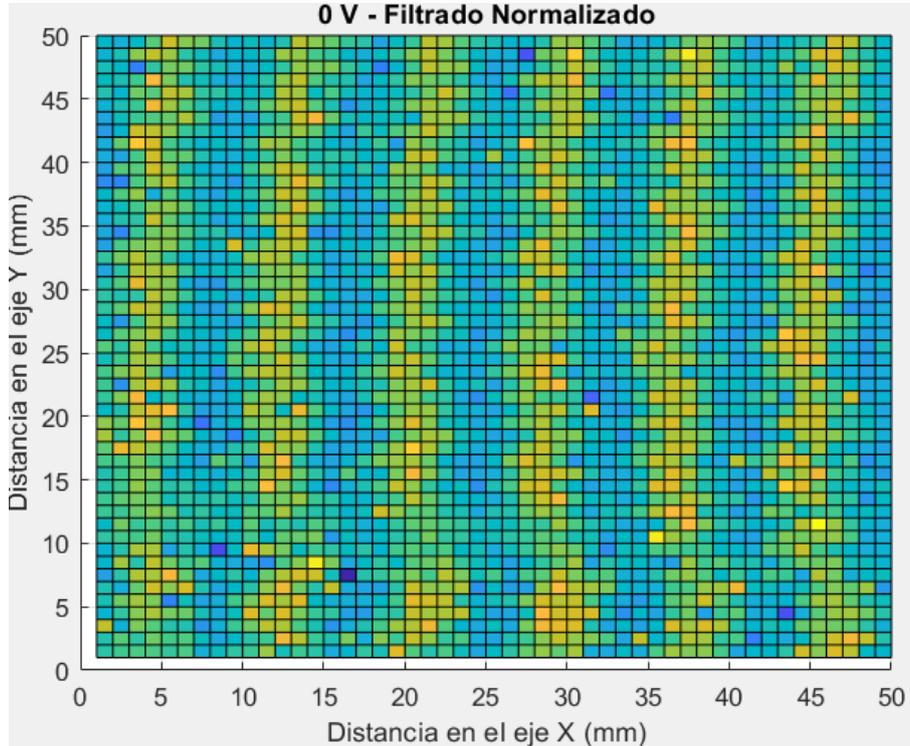


Figura 3.29: Imagen guía de la onda a 0V

El patrón observado en la imagen sugiere la presencia de un fenómeno de interferencia de ondas, lo cual indica la coexistencia de frentes de onda reflejados y transmitidos dentro del medio de propagación. Este comportamiento podría ser consecuencia de bordes, obstáculos o variaciones en la impedancia acústica del material por donde se propaga la onda. La periodicidad de los patrones de color es característica de ondas estacionarias o fenómenos de difracción, lo que podría originarse por la interacción de la onda ultrasónica con estructuras presentes en el entorno.

Dado que la onda tiene una frecuencia de 40 kHz, su longitud de onda es relativamente corta, lo que favorece la formación de patrones de interferencia y reflexión altamente detallados. En aplicaciones prácticas, este tipo de representación resulta útil para la inspección de materiales, la caracterización de medios de propagación y el análisis de fenómenos acústicos. La variabilidad en la intensidad medida en diferentes puntos de la cuadrícula sugiere fluctuaciones en la propagación, producto de efectos como la absorción, la dispersión y los cambios en las condiciones del medio.

A continuación, se procede a analizar la figura 3.28 mencionada previamente, obteniendo el siguiente resultado: el patrón observado sugiere la presencia de un fenómeno de interferencia de ondas, lo que indica la coexistencia de frentes de onda

reflejados y transmitidos dentro del medio de propagación. En este caso, la presencia de una tensión de 65 kV y la manifestación de ondas parciales pueden estar influyendo en la distribución espacial de la onda de 40 kHz, generando estructuras más definidas en los patrones de interferencia. La periodicidad de los colores y la disposición de las zonas de alta y baja intensidad en la imagen son indicativas de ondas estacionarias o fenómenos de difracción, lo que podría estar relacionado con la interacción de la onda ultrasónica y las alteraciones inducidas por la alta tensión.

Dado que la onda opera a una frecuencia de 40 kHz, su longitud de onda es relativamente corta, lo que favorece la aparición de patrones detallados de interferencia y reflexión. En este contexto, la aplicación de una tensión elevada podría estar afectando la propagación de la onda, a través de fenómenos como la ionización del medio, alteraciones en la impedancia acústica o cambios en las propiedades dieléctricas del material por donde la onda se propaga. La variabilidad en la intensidad medida en diferentes puntos de la cuadrícula sugiere fluctuaciones en la propagación, probablemente debidas a efectos de absorción, dispersión y cambios en las condiciones del medio generados por la presencia de ondas parciales.

Ahora por otra parte para diferenciar si hay o no alguna diferencia entre las figuras 3.28 y 3.29 se realizó una resta como se evidencia en la figura 3.25 dando como resultado la siguiente figura 3.30.

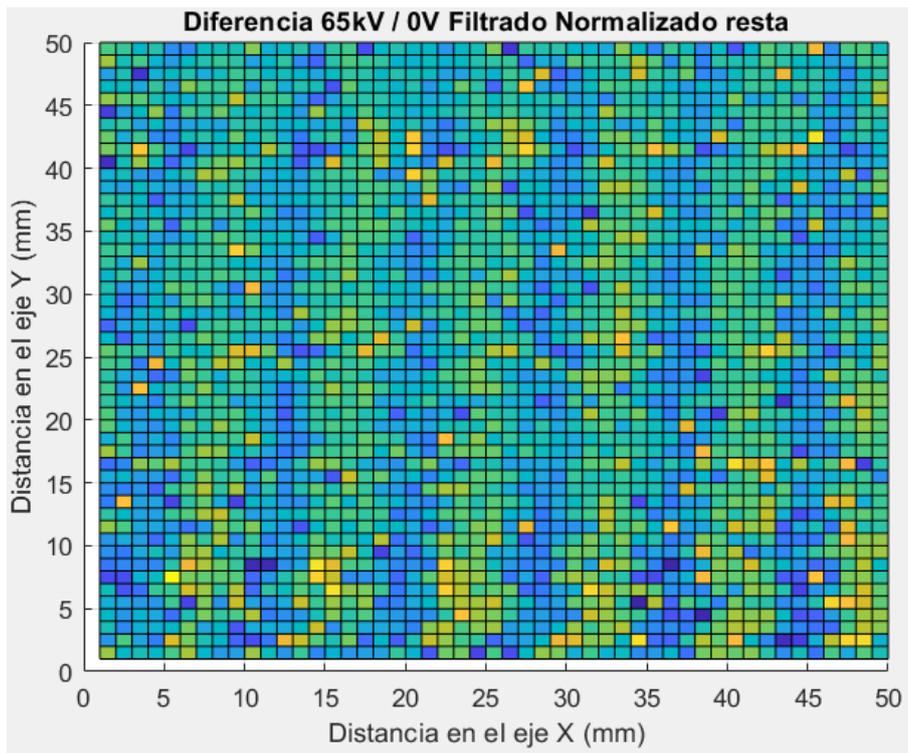


Figura 3.30: Resta de la imagen guía y de la imagen de onda bajo tensión de 65kV

Al analizar la figura 3.30, se observa que la imagen resultante de la resta entre las representaciones normalizadas a 0V y 65kV proporciona información clave sobre las diferencias en la propagación de la onda ultrasónica bajo la influencia de una

alta tensión. La reducción del patrón estructurado observado en las imágenes individuales sugiere que, aunque hay modificaciones en la distribución de la intensidad de la onda debido a la presencia de 65kV, estos cambios no son drásticos en cuanto a la periodicidad general del fenómeno de interferencia y reflexión.

El patrón obtenido muestra una dispersión más homogénea de colores con menor definición de estructuras periódicas, lo que indica que el campo eléctrico intenso introdujo alteraciones en la propagación de la onda sin generar una reorganización completa del patrón de interferencia. Esto sugiere que el efecto de la alta tensión sobre el medio es más sutil y se manifiesta en fluctuaciones locales en la intensidad de la onda, posiblemente debido a cambios en la impedancia acústica del material o efectos secundarios como la ionización parcial del medio. La presencia de pequeñas regiones con valores diferenciados en la cuadrícula puede estar asociada a efectos de dispersión adicionales inducidos por la tensión, que afectan la propagación de la onda en puntos específicos. Estos cambios podrían deberse a variaciones en la densidad del material, modificaciones en las propiedades dieléctricas del medio o la influencia de cargas eléctricas en la propagación de la onda ultrasónica.

Desde una perspectiva práctica, esta representación diferencial es útil para identificar las áreas donde la aplicación de alta tensión tiene un impacto mayor en la propagación de la onda, lo cual resulta relevante en estudios de compatibilidad electromagnética, inspección de materiales bajo tensión y análisis de la interacción entre ultrasonido y campos eléctricos intensos. La variabilidad en la intensidad de la imagen sugiere que el efecto no es uniforme en todo el medio, sino que depende de la distribución de cargas y de las propiedades locales del entorno.

Por último, se realizó una suma de las figuras 3.28 y 3.29 dando como resultado la siguiente figura 3.31.

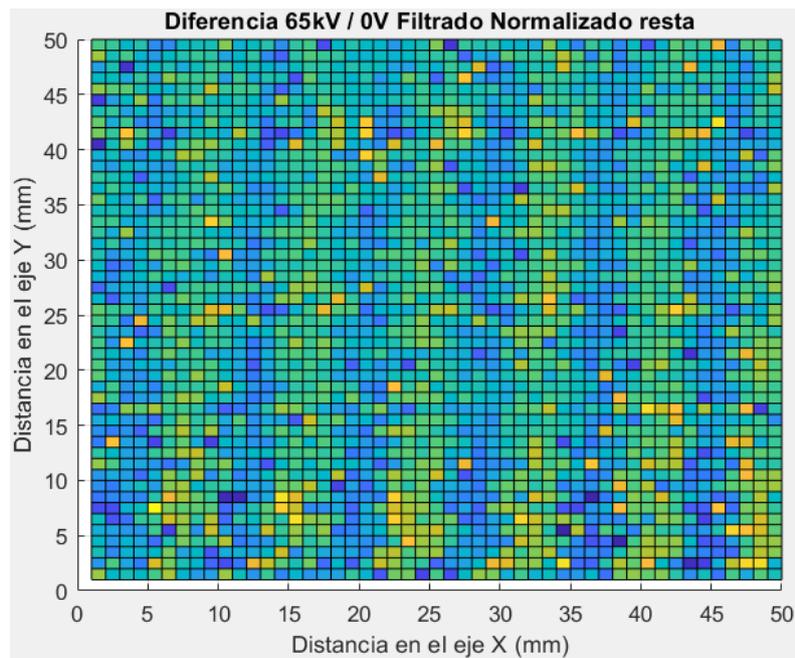


Figura 3.31: Suma de la imagen guía y de la imagen de onda bajo tensión de 65kV

La imagen resultante de la suma de las representaciones normalizadas a 0V y 65kV revela un patrón que conserva las características estructurales observadas en ambas imágenes individuales, pero con una mayor intensidad en las regiones donde la interferencia de ondas es más pronunciada. La periodicidad de los patrones de color es clara, lo que indica que la aplicación de la alta tensión no alteró la organización espacial de las ondas ultrasónicas, sino que reforzó ciertas áreas de interferencia y difracción.

El hecho de que el patrón general se mantenga y que las zonas de mayor intensidad se amplifiquen sugiere que la superposición de ambas configuraciones resalta la contribución de cada una al comportamiento global de la onda en el medio.

Desde una perspectiva de ingeniería, este análisis permite evaluar cómo los campos eléctricos afectan la transmisión de ondas acústicas en materiales, con posibles aplicaciones en la detección de fallos en sistemas eléctricos de alta tensión, el monitoreo de la integridad estructural y la optimización de técnicas de inspección basadas en ultrasonido. La conservación de la periodicidad sugiere que la onda ultrasónica sigue respondiendo a las propiedades físicas del medio, aunque con una modulación inducida por la tensión aplicada.

3.5 ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO

Introducción

El análisis técnico-económico de este estudio tiene como objetivo evaluar la viabilidad y justificación económica de los recursos necesarios para llevar a cabo el experimento, el cual investiga el impacto de campos eléctricos intensos en la propagación de ondas ultrasónicas. Para ello, se examinan los costos directos e indirectos asociados con la adquisición de datos, procesamiento de imágenes del prototipo de interferometría de retroalimentación óptica para detección optoacústica en conjunto con la operación del equipamiento del laboratorio de Alta Tensión.

3.5.1 Costo del proyecto

- **Generación del campo eléctrico Intenso**

Tabla 3.3: Generación Campo Eléctrico Intenso (Laboratorio Alta Tensión)

Item	Recurso	Cantidad	Precio x Hora (\$)	Horas	Total US \$
1	Módulo de control (HV 9103)	1	-	-	-
2	Transformador de prueba (HV 9105)	1	-	-	-
3	Voltímetro pico digital (HV 9150)	1	-	-	-
4	Capacitor de medida (HV 9141)	1	-	-	-
5	Barra de conexión (HV 9108)	2	-	-	-
6	Copa de conexión (HV 9109)	4	-	-	-
7	Base de conexión (HV 9110)	1	-	-	-
8	Medidor de distancia entre chispa (HV 9133)	1	-	-	-
9	Resistor de carga (HV 9121)	1	-	-	-
10	Rectificador (HV 9111)	2	-	-	-
11	Condensador de impulso (HV 9112)	1	-	-	-
12	Resistor de medida (HV 9133)	1	-	-	-
13	Barra aislante (HV 9124)	1	-	-	-
Costo de uso del Laboratorio de Alta Tensión - Estudiantes					\$2.600
TOTAL					\$2.600

- **Setup Cartesiano**

Tabla 3.4: Setup: Eje Cartesiano X - Y

Item	Recurso	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Total US \$
1	Convertidor Modelo S-50-24	1	45	45
2	Digital Stepper Driver (DM542T)	2	35	70
3	Motores de paso (NEMA)	2	38	76
4	Estructura (X, Y) de tornillos de bola	1	130	130
5	Estructura de Madera	1	30	30
6	Placa Shield Arduino Uno	1	5	5
7	Arduino Uno	1	27	27
8	Caja Aluminica	1	20	20
9	Caja de Protección Arduino	1	10	10
10	Sensor Fin de Carrera	2	3	6
11	Mano de Obra código Arduino - LabVIEW	1	60	60
TOTAL				475

- **Setup del método de Interferometria**

Tabla 3.5: Setup: Método de la Interferometría de Retroalimentación Óptica para Detección Optoacústica

Item	Recurso	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Total US \$
1	Diodo Láser (L1320P5DFB)	1	150	150
2	Espejo Thorlabs (PF10-03-F01)	1	100	100
3	Transductor Piezoléctrico (40 kHz)	1	5.5	5.5
4	Estructura de soporte alúmina	1	35	35
5	Chasis Compact Daq 9178	1	2.300	2.300
6	NI 9223	1	2000	2000
7	Jaula de Faraday para Láser	1	15	15
8	Taco 3D para acople	1	5	5
9	Fuente Variable DC Siglent	1	550	550
10	Sondas BNC	1	50	50
11	Monitor Dell E1916Hf	1	90	90
12	Generador de Funciones GW Instek	1	450	450
13	CPU MSI Corsair 64 RAM - 4TB	1	2.550	2.050
TOTAL				7.800,5

- **Costo Total del Proyecto Técnico/Experimental**

Tabla 3.6: Estudio Experimental del Efecto de Campos Eléctricos Intensos sobre la Propagación de Ondas Ultrasónicas

Item	Descripción	Precio (US \$)
1	Setup: Eje Cartesiano X - Y	475
2	Generación Campo Eléctrico Intenso (Laboratorio Alta Tensión)	2.600
3	Setup: Método de la interferometría de retroalimentación óptica para detección optoacústica	7.800,5
	TOTAL	10.875,5

3.6 CONCLUSIONES

Este proyecto técnico-experimental ha sido posible gracias a la implementación de rigurosas medidas de seguridad, esenciales para proteger tanto al personal como los componentes del sistema al trabajar con tensiones de hasta 70 kV. Se siguieron estrictamente las normas del protocolo de seguridad del laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana, incluyendo la revisión de las cinco reglas de oro de la seguridad eléctrica, para asegurar que todas las conexiones y desconexiones se realizaran de manera controlada. Además, se utilizó equipo de protección personal adecuado, se establecieron distancias seguras en la disposición del sistema experimental, y se implementaron procedimientos para la alimentación y desenergización del circuito tras cada prueba. También se incorporaron medidas técnicas como apantallamiento de cables, construcción de jaulas de Faraday y adecuada conexión a tierra de superficies metálicas expuestas al campo eléctrico, lo cual resultó crucial para evitar daños en el equipo y garantizar la integridad de los datos adquiridos.

En cuanto al análisis de los resultados, a pesar de las limitaciones de tiempo que impidieron un análisis más profundo mediante herramientas matemáticas avanzadas, el estudio realizado evidenció que la aplicación de un voltaje de alta tensión (65 kV) tiene un impacto significativo en la propagación de la señal medida. A través de gráficos tridimensionales, señales en el dominio del tiempo y transformadas de Fourier, se observaron variaciones en la amplitud, distribución y respuesta espectral de la señal. En las pruebas iniciales, con un muestreo de 10x10 mm, no se obtuvieron resultados claros debido al cono de propagación, por lo que se aumentó el área de muestreo a 50x50 mm, donde los resultados fueron más evidentes. En este rango, el voltaje de 65 kV produjo los mejores resultados, revelando interferencias de ondas y la presencia de ondas estacionarias o fenómenos de difracción, probablemente causados por la interacción entre la onda ultrasónica y las alteraciones inducidas por la alta tensión.

3.7 Recomendaciones

1. Se recomienda optimizar el sistema de desplazamiento actual constituido por motores lineales, por unos de mayor resolución y control, con el fin de lograr movimientos más lisos, precisos y libres de vibraciones. Este cambio permitiría alcanzar desplazamientos de alta precisión, en rangos milimétricos o incluso nanométricos. Además, la implementación de este nuevo sistema reduciría significativamente el tiempo de muestreo, permitiendo la captura de datos en un área de 50x50 mm en cuestión de minutos, en lugar de horas.
2. Si se emplean los mismos componentes, se propone optimizar el sistema de control de los motores paso a paso mediante la implementación de un sistema de rampa para la aceleración y desaceleración. Este enfoque permitirá que el motor inicie y detenga su movimiento de manera progresiva, reduciendo los efectos de vibración y resonancia mecánica asociados a cambios bruscos en la velocidad. En comparación con el control basado en señales sinusoidales, la aplicación de un perfil de rampa mejora la estabilidad del sistema y minimiza la generación de errores de posicionamiento. Como resultado, se obtendrá una imagen bidimensional de mayor calidad, con menor distorsión y mayor precisión en la reconstrucción espacial.
3. A pesar de la implementación de los aislamientos previstos, aún se presenta una inducción mínima del 20% en el sistema, lo que puede generar interferencias en el láser, corrientes parásitas y variaciones en el potencial del prototipo, afectando su estabilidad y precisión. Para mitigar estos efectos, se recomienda fortalecer el aislamiento del experimento mediante mejoras en el apantallamiento electromagnético, optimizar el sistema de puesta a tierra y aplicar medidas de protección contra la acumulación de carga electrostática.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] David K. Cheng. *Fundamentos de Electromagnetismo Para Ingenieria*. Addison Wesley Longman, 1998, p. 509. ISBN: 9789684443273.
- [2] Michael Faraday. *Experimental Researches in Electricity*. London, 1852.
- [3] James Clerk Maxwell. *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Oxford: Clarendon Press, 1873.
- [4] Margaret Cheney. *Tesla: Man Out of Time*. Simon & Schuster, 2001.
- [5] R. Van de Graaff. “High-Voltage Generator”. In: *Physical Review* 37.1 (1931), pp. 117–119.
- [6] Oleg Jefimenko. *Electricity and Magnetism: An Introduction to the Theory of Electric and Magnetic Fields*. Appleton-Century-Crofts, 1971. URL: https://books.google.com/books/about/Electricity_and_Magnetism.html?id=GztsAAAAAAAJ.
- [7] David J. Griffiths. *Introduction to Electrodynamics*. 4th Edition. Pearson Education, 2013.
- [8] Raymond A. Serway and John W. Jewett. *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*. 9th. Boston, MA: Brooks/Cole, 2013.
- [9] David Halliday, Robert Resnick, and Jearl Walker. *Fundamentals of Physics*. 10th. Hoboken, NJ: Wiley, 2014.
- [10] Matthew N. O. Sadiku. *Elements of electromagnetics*. Third edition. Oxford series in electrical and computer engineering. Includes index. New York: Oxford University Press, 2018. 16895 pp. ISBN: 9780190698614.
- [11] William F. Smith and Javad Hashemi. *Fundamentals of Material Science and Engineering*. 3rd. New York: McGraw-Hill Education, 2006.
- [12] S.O. Kasap. *Principles of Electronic Materials and Devices*. 4th. New York: McGraw-Hill Education, 2017.
- [13] Michael F. Ashby. *Materials Selection in Mechanical Design*. 4th. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011.
- [14] John David Jackson. *Classical electrodynamics*. 3. ed., [Nachdr.] Literaturangaben. Hoboken, NY: John Wiley & Sons, 1999. 808 pp. ISBN: 978-0471309321.
- [15] Gorur Govinda. *Dielectrics in Electric Fields*. Berlin: Springer, 2021.
- [16] Edmund Kuffel, Walter S. Zaengl, and J. Kuffel. *High voltage engineering. Fundamentals*. 2. Ed., Digital Print. Includes bibliographical references and index. Amsterdam: Newnes, 2009. 539 pp. ISBN: 9780750636346.

- [17] C. Mazzetti and G. Montanari. “Dielectric Breakdown Phenomena in Electrical Insulation Systems”. In: *IEEE Transactions on Electrical Insulation* 18.3 (2011), pp. 456–463.
- [18] Ingeniería de Máquinas y Sistemas Eléctricos. *Efecto Corona en líneas de Alta Tensión*. 2016. URL: <https://imseingenieria.blogspot.com/2016/08/efecto-corona-en-lineas-de-alta-tension.html> (visited on 02/09/2025).
- [19] C. Suwanasri et al. “Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment Using High Frequency Current Transducer”. In: (2013).
- [20] Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos. *IEEE standard for high-voltage testing techniques*. Includes bibliographical references (pages 186-199). New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013. 1199 pp. ISBN: 9780738182582.
- [21] IEEE. *IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above*. IEEE, 2012.
- [22] Muhammad H. Rashid. *Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications*. 4th. Pearson, 2014.
- [23] Mulukutla S. Sarma J. Duncan Glover Thomas Overbye. *Power System Analysis and Design*. 5th. Cengage Learning, 2012.
- [24] J. Nahman. “Capacitance and Inductance of Power Cables: A Simplified Approach”. In: *Transactions on Power Delivery* 21.2 (2006), pp. 562–567.
- [25] Charles A. Gross. *Fundamentals of Electrical Engineering*. Ed. by Thaddeus A Roppel. 1st ed. Description based on publisher supplied metadata and other sources. Boca Roca: Chapman and Hall/CRC, 2012. 1465 pp. ISBN: 9781439898079.
- [26] Diego C. Giménez. *Materiales Aislantes Eléctricos*. Documento técnico sobre materiales eléctricos y sus propiedades aislantes. Instituto San Pablo - Luján, 2018.
- [27] M. Stone. *Electrical Insulation Systems: Principles and Practices*. McGraw-Hill Education, 2020.
- [28] J. Harrison. *High Power Electrical Insulation and Thermal Management in Power Systems*. IEEE Press, 2013.
- [29] J. Thompson. “Electroacoustic Effects in Solids”. In: *Applied Physics Letters* 112.5 (2018), p. 051902. URL: <https://doi.org/10.1063/1.5021835>.
- [30] D. Baker. *Static Electricity in Industrial Processes*. Elsevier, 2015.
- [31] P. Johnson. *Electrostatic Discharge Control in Electrical Systems*. CRC Press, 2017.
- [32] T. Roberts. *Grounding and Bonding in Electrical Systems*. McGraw-Hill Education, 2020.
- [33] IEC. *Live working - Electrical insulating gloves*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2014.
- [34] UNE-EN. *EPP- Equipos de protección personal. Calzado conductor para trabajos en alta tensión*. Madrid, España, 2018.

- [35] Occupational Safety and Health Administration. *Hearing Protection*. U.S. Department of Labor. 2023.
- [36] ANSI. *Industrial Head Protection*. Washington D.C., USA: ANSI, 2019.
- [37] *IEEE Guide for Shielding and Grounding of Power Transmission Lines*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1991. 64 pp. ISBN: 978-0738102450.
- [38] International Electrotechnical Commission. *IEC "Recommendations for voltage measurement by means of sphere-gaps (one sphere earthed)"*. International Electrotechnical Commission, 1960. ISBN: 2831800072.
- [39] IEC. *IEC 61000 - Electromagnetic compatibility (EMC)*. Multiple parts covering emission and immunity standards. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2005. Various.
- [40] Leo L. Beranek. *Acoustics*. McGraw-Hill, 1954.
- [41] Gary S. Settles. *Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media*. Springer, 2001.
- [42] Nathan Blaunstein and Vladimir Yakubov. "Tomography of Electromagnetic and Acoustic Waves: Methods and Applications". In: *Journal of Applied Physics* 132 (2022), pp. 456–470. DOI: [10.1063/5.0089789](https://doi.org/10.1063/5.0089789).
- [43] Fernando Urgiles Ortiz. "2D and 3D visualization of acoustic waves by optical feedback interferometry". PhD thesis. Institut National Polytechnique de Toulouse, 2019.
- [44] *Introducción a las Ondas*. URL: <https://www.calculisto.com/topics/ondas> (visited on 02/09/2025).
- [45] Eugene Hecht. *Optics*. 4th. Addison-Wesley, 2002. ISBN: 978-0805385663.
- [46] T. Schmitt. "Non-Destructive Testing with Ultrasonic Waves". In: *Materials Testing* 63.8 (2021), pp. 711–720. URL: [https://www.materials-testing.com/article/S0025-5327\(21\)00190-0/fulltext](https://www.materials-testing.com/article/S0025-5327(21)00190-0/fulltext).
- [47] Y. Wang. "Ultrasonic Distance Measurement Techniques". In: *Measurement Science and Technology* 31.6 (2020), p. 065004. URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab8bb5>.
- [48] M. Baker. *Ultrasonic Measurements in Engineering*. Springer, 2020. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-41523-9>.
- [49] Byju's. *Mechanical Waves: Transverse Waves and Longitudinal Waves*. Accedido: 10-Feb-2025. 2025. URL: <https://byjus.com/physics/mechanical-waves-transverse-waves-and-longitudinal-waves/>.
- [50] Matan. *Constante de Atenuación — Explicación y Uso*. Accedido: febrero 2025. 2024. URL: <https://www.electricity-magnetism.org/es/constante-de-atenuacion-explicacion-y-uso/>.
- [51] Radiopaedia. *Atenuación Ultrasonica*. Accedido: febrero 2025. 2024. URL: <https://radiopaedia.org/articles/attenuation-ultrasound>.
- [52] Mateo Quizhpi. *DISRUPCIÓN ELÉCTRICA Y CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA - DC*. Presentación de diapositivas, Lab. Alta Tensión. Mgtr. Mateo Quizhpi. 2025.

- [53] Mateo Quizhpi C. *PRÁCTICA 2: RIGIDEZ DIELÉCTRICA Y CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA EN AC*. Presentación de diapositivas, Lab. Alta Tensión. Mgtr. Mateo Quizhpi C. 2025.
- [54] Harvy Ruben Palma Mazzini and Edson Paul Pareja Veliz. *Manual de Prácticas para el Laboratorio de Alta Tensión II*. Guayaquil, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana, 2015.
- [55] Electronics Tutorials. *Filter Circuits Tutorial*. Accedido: 14-Mar-2025. 2025. URL: <https://www.electronics-tutorials.ws/filter>.
- [56] SvanTek. *Transformada Rápida de Fourier (FFT)*. Accedido el 20 de febrero de 2025. 2025. URL: <https://svantek.com/es/academia/transformada-rapida-de-fourier-fft/>.
- [57] Study.com. *Contour Lines on Maps: Purpose & Importance*. Accedido: 20 de febrero de 2025. 2025. URL: <https://study.com/academy/lesson/contour-lines-maps-purpose-importance.html>.

ANEXOS

Observaciones y Complicaciones

Durante la fase 1 de alta tensión en corriente alterna, se produjo una descarga eléctrica al inicio de la secuencia de barrido del diodo láser, cuando la tensión alcanzó 50 kV. Este fenómeno fue consecuencia de la inducción electromagnética originada por la ionización del aire en la brecha entre los electrodos. Como resultado, la descarga se propagó desde el sensor ultrasónico hasta el fin de carrera del eje horizontal, cuyos terminales expuestos y conductores sin protección adecuada facilitaron la conducción de la corriente inducida. La propagación de la inducción alcanzó el microcontrolador Arduino Uno, provocando daños en su circuito interno.

Gracias a las medidas de protección previamente implementadas, como el aterrizaje adecuado del mueble de operación y el blindaje de ciertos componentes, no se registraron daños en elementos críticos como los drivers, el convertidor o el puerto de comunicación del computador. No obstante, se implementaron mejoras adicionales con el objetivo de mitigar riesgos futuros y garantizar la seguridad del sistema.

Para prevenir nuevas propagaciones de descargas por inducción, tanto los fines de carrera como el sensor ultrasónico fueron apantallados utilizando papel de aluminio, el cual actúa como una barrera conductora que captura las corrientes inducidas y las redirige hacia el sistema de aterrizaje. Esta medida previene la afectación de los componentes electrónicos sensibles por interferencias electromagnéticas. Adicionalmente, se aplicó una capa de cinta aislante sobre el papel de aluminio para asegurar el aislamiento eléctrico y prevenir cortocircuitos. Por otra parte, debido a su proximidad con el campo eléctrico intenso, la estructura de interferometría fue revestida con papel Mylar, material que impide el paso de la corriente debido a sus propiedades dieléctricas.



Figura 3.32: Apantallamiento fin de carrera

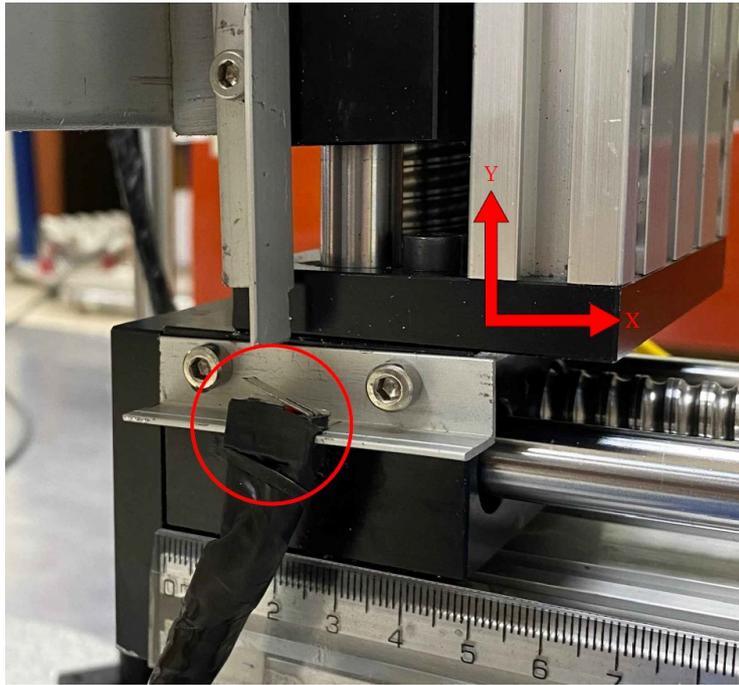


Figura 3.33: Fines de Carrera del Eje Y

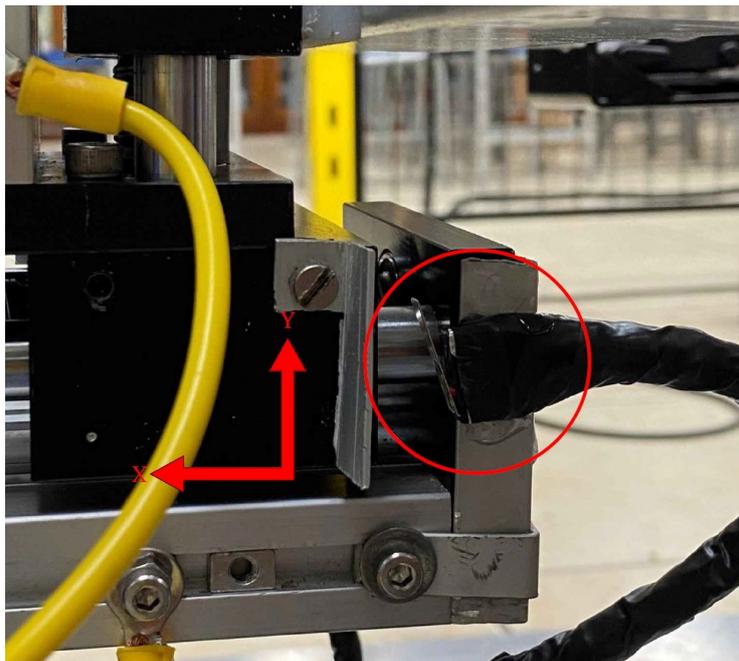


Figura 3.34: Fines de Carrera del Eje X

Asimismo, se verificó la correcta conexión a tierra de todos los elementos, asegurando que cualquier corriente inducida fluya directamente hacia el sistema de aterrizaje sin causar daños adicionales. Estas acciones fortalecieron significativamente la robustez del sistema, permitiendo su operación segura incluso en condiciones de alta tensión.

Tabla 3.7: Áreas del Trabajo de Grado

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL EFECTO DE CAMPOS ELÉCTRICOS INTENSOS SOBRE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS ULTRASONICAS		
Título del Trabajo:	Estética	
Restricciones múltiples (dos o más)	Accesibilidad	
	Códigos	X
	Costos	X
	Extensibilidad	
	Interoperabilidad	X
	Mantenibilidad	
	Mercadeo	
	Regulaciones	
	Normativas	X
	Usabilidad	Otros:
Normas relevantes (dos o más)	IEEE Std 4-2013	X
	IEC 61000	X
	IEEE Std 442	X
	IEC 1960	X
Elementos del proceso	Identificación de oportunidades	Generación de soluciones múltiples
	Desarrollo de requerimientos	X Evaluación de soluciones
	Procesos iterativos	X Consideración de riesgos
	Realizar compromisos o tratos	
Basado en trabajos anteriores	Protecciones	X Iluminación
	Optimización de sistemas	Alta Tensión
	Energías alternativas	Distribución
	Máquinas eléctricas	Otros temas