



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

– **TELECOM** ESCUELA  
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR  
DE INGENIERÍA DE  
TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de  
Telecomunicación

Diseño y caracterización de una lente ultrasónica plana  
utilizando principios de series numéricas.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de  
Telecomunicación

AUTOR/A: Ortiz Rodríguez, Alejandro Daniel

Tutor/a: Tarrazó Serrano, Daniel

Cotutor/a: Castiñeira Ibáñez, Sergio

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

**NO PONER PORTADA**

## Resumen

El objetivo de este trabajo es el estudio de la capacidad de modular haces de ultrasonidos mediante la modificación de lentes acústicas basadas en principios de series numéricas combinadas con otra tipología de lentes difractivas. Se desarrollará un trabajo tanto numérico, describiendo toda la serie de pasos y herramientas numéricas fundamentadas en el método de los elementos finitos que se emplean y el proceso para crear un modelo computacional capaz de simular los fenómenos físicos relacionados con la modulación de un haz de ultrasonidos; como un trabajo experimental. Este proceso implica realizar una serie de pruebas y mediciones en un entorno controlado que permite comparar los resultados obtenidos mediante simulaciones computacionales con los datos observados en condiciones reales. El trabajo tiene como fin la creación de una nueva lente ultrasónica, en la cual se evaluarán los parámetros de la conformación focal tales como la Ganancia Focal, el FWHM o el FLHM.

## Resum

L'objectiu d'aquest treball és l'estudi de la capacitat de modular feixos d'ultrasons mitjançant la modificació de lents acústiques basades en principis de sèries numèriques combinades amb una altra tipologia de lents difractives. Es desenvoluparà un treball tant numèric, descrivint tota la sèrie de passos i eines numèriques fonamentades en el mètode dels elements finits que es fan servir i el procés per crear un model computacional capaç de simular els fenòmens físics relacionats amb la modulació d'un feix d'ultrasons ; com un treball experimental. Aquest procés implica fer una sèrie de proves i mesuraments en un entorn controlat que permet comparar els resultats obtinguts mitjançant simulacions computacionals amb les dades observades en condicions reals. El treball té com a fi la creació d'una nova lent ultrasònica, en la qual s'avaluaran els paràmetres de la conformació focal com ara el guany focal, l'FWHM o el FLHM.

## Abstract

The objective of this work is the study of the ability to modulate ultrasound beams by modifying acoustic lenses based on numerical series principles combined with another typology of diffractive lenses. Numerical work will be developed, describing the entire series of steps and numerical tools based on the finite element method used and the process to create a computational model capable of simulating the physical phenomena related to the modulation of an ultrasound beam. ; as experimental work. This process involves carrying out a series of tests and measurements in a controlled environment that allows the results obtained through computer simulations to be compared with the data observed in real conditions. The purpose of the work is the creation of a new ultrasonic lens, in which the focal conformation parameters such as Focal Gain, FWHM or FLHM will be evaluated.



## Agradecimientos:

Me gustaría agradecer a todas esas personas que me han ayudado a lo largo de esta etapa de mi vida hasta finalizar mi titulación.

En primer lugar, dar gracias a mis tutores, Daniel y Sergio, que me han enseñado todo lo necesario para realizar el proyecto y en muchas ocasiones me han hecho ver la luz cuando lo veía todo oscuro.

A mis padres, Chantal y Arturo, y a mi hermana, Claudia, que han celebrado mis alegrías y han soportado mis momentos más difíciles. Gracias de verdad.

A Martín y Borja, que el camino juntos ha sido mucho más bonito.

A mi grupo de amigos, que siempre han confiado en mí cuando el resto lo veía imposible.

A mis chavales de la universidad, que lo que empezó como desconocidos ha acabado como amigos de por vida.

Y para mis abuelas, aunque aún no sepan de que va mi carrera, se han alegrado más por mí que nadie.

En cierto modo, sin vosotros esto no podría haber ocurrido.

## RESUMEN EJECUTIVO

La memoria del TFG del Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación debe desarrollar en el texto los siguientes conceptos, debidamente justificados y discutidos, centrados en el ámbito de la ingeniería de telecomunicación

CONCEPT (ABET)	CONCEPTO (traducción)	¿Cumple? (S/N)	¿Dónde? (páginas)
1. IDENTIFY:	1. IDENTIFICAR:		
1.1. Problem statement and opportunity	1.1. Planteamiento del problema y oportunidad	S	13
1.2. Constraints (standards, codes, needs, requirements & specifications)	1.2. Toma en consideración de los condicionantes (normas técnicas y regulación, necesidades, requisitos y especificaciones)	S	13
1.3. Setting of goals	1.3. Establecimiento de objetivos	S	13
2. FORMULATE:	2. FORMULAR:		
2.1. Creative solution generation (analysis)	2.1. Generación de soluciones creativas (análisis)	S	19
2.2. Evaluation of multiple solutions and decision-making (synthesis)	2.2. Evaluación de múltiples soluciones y toma de decisiones (síntesis)	S	29
3. SOLVE:	3. RESOLVER:		
3.1. Fulfilment of goals	3.1. Evaluación del cumplimiento de objetivos	S	31-36
3.2. Overall impact and significance (contributions and practical recommendations)	3.2. Evaluación del impacto global y alcance (contribuciones y recomendaciones prácticas)	S	37, 40



## Contenido

1. Introducción.....	4
1.1 Concepto y Tipos de Lentes Acústicas .....	5
1.1.1 Lentes Refractivas .....	5
1.1.2 Lentes Difractivas.....	6
1.2 Comparación entre Lentes Difractivas y Lentes Acústicas Tradicionales.....	7
1.3 Proceso de Diseño de una Lente de Fresnel .....	8
1.3.1 Materiales Utilizados en la Fabricación.....	8
1.3.2 Técnicas de Fabricación .....	8
1.4 Aplicaciones.....	9
1.4.1 Imágenes.....	9
1.4.2. Fotografía .....	9
1.4.3. Iluminación: .....	9
1.4.4. Proyección:.....	9
1.4.5. Energía Solar: .....	9
1.5 Introducción a las Series Numéricas.....	10
1.5.1 Aplicación de Series Numéricas en el Diseño de Lentes Acústicas .....	10
1.5.2 Ejemplos de Series Numéricas Utilizadas.....	11
1.5.3 Introducción a los Números Primos .....	11
1.5.4 Aplicaciones de los Números Primos.....	12
2. Objetivos.....	13
2.1 Objetivo general.....	13
2.2 Objetivos específicos .....	13
2.3 CRONOGRAMA TEMPORAL .....	13
3. Metodología.....	15
3.1 Método de los Elementos Finitos (FEM).....	15
3.1.1 Fundamentos del Método de los Elementos Finitos.....	15
3.1.2 Aplicaciones del FEM en la Simulación de Fenómenos Físicos .....	15
3.1.3 Herramientas y Software para el Análisis FEM.....	15
3.2 Parámetros de Conformación Focal.....	16
3.2.1 Definición y Cálculo de la Ganancia Focal.....	16
3.2.2 Full Width at Half Maximum (FWHM) y Full Length at Half Maximum (FLHM). .....	17



3.3 Métodos de Medición y Evaluación de los Parámetros Focales.....	17
4. Modelo numérico .....	19
4.1 Introducción de COMSOL Multiphysics®.....	19
4.2 Creación modelos numéricos mediante COMSOL Multiphysics®.....	19
4.2.1 Construcción del modelo.....	20
4.2.2 Definiciones globales .....	20
4.2.3 Geometría .....	21
4.2.4 Materiales .....	24
4.2.5 Mallado.....	25
4.2.6 Selección del tamaño de mallado .....	25
4.2.7 Estudio.....	25
5. Montaje experimental.....	27
5.1 Creación del prototipo mediante impresión 3D.....	27
5.2 Montaje Experimental.....	29
6. Resultados .....	31
7. Conclusiones .....	37
8. Relación del trabajo con los objetivos de desarrollo sostenible de la agenda 2030...	38
9. Trabajos Futuros.....	40
9.1 Avances Recientes en el Diseño de Lentes de Fresnel .....	40
9.2 Potenciales Futuras Aplicaciones .....	40
10. Bibliografía.....	41



## Índice de Figuras

Figura 1. Fenómeno de reflexión.....	4
Figura 2. Fenómeno de refracción.....	5
Figura 3. Dibujo de una lente de gradiente modelando una onda mediante refracción ...	6
Figura 4. Una lente de Fresnel (1) y una lente convencional (2).....	8
Figura 5. Los primos en rosa dentro de los 100 primeros números .....	11
Figura 6. Distribución temporal de las tareas .....	14
Figura 7. Pantalla Constructor de modelo del Comsol.....	20
Figura 8. Subapartado de Parámetros en COMSOL.....	21
Figura 9. Imagen de nuestra geometría en COMSOL .....	21
Figura 10. Ancho y alto de nuestro rectángulo.....	23
Figura 11. Ancho y alto de nuestro host.....	23
Figura 12. Posición del host .....	23
Figura 13. Posición de inicio de los rectángulos que forman la lente .....	24
Figura 14. Parámetros de densidad y velocidad del sonido del agua .....	24
Figura 15. Parámetros de densidad y velocidad del sonido del latón.....	24
Figura 16. Parámetros que metemos en la impresora.....	27
Figura 17. Especificaciones del PLA .....	27
Figura 18. Pieza final en UltimakerCura .....	28
Figura 19 Lente fresnel normal impresión 3D.....	28
Figura 20. Lente fresnel con máscara de números primo impresión 3D.....	29
Figura 21 Configuración experimental donde se han realizado las pruebas desde un plano general, desde dentro del tanque y el ordenador programador.....	30
Figura 22. Corte para calcular FLHM .....	31
Figura 23. Corte para calcular FWHM.....	31
Figura 24. Mapa de Ganancia lente Fresnel .....	32
Figura 25. Mapa de ganancias lente de Fresnel con máscara de números primos .....	32
Figura 26. Corte longitudinal de lente original y primos .....	33
Figura 27. Corte longitudinal experimental Primos .....	33
Figura 28. Corte longitudinal experimental Fresnel.....	34
Figura 29. Corte longitudinal que muestra comparación entre teórica y experimental de primos .....	35
Figura 30. Corte longitudinal comparación entre teórica y experimental normal.....	36

# 1. Introducción

Los ultrasonidos son ondas de sonido cuya frecuencia es mayor que el rango de audición humano, generalmente superior a 20 kHz. Las ondas tienen la propiedad de propagarse a través de una amplia gama de materiales en sus estados sólido, líquido y gaseoso, ya que son de naturaleza mecánica. La frecuencia de una onda de ultrasonido hace referencia al número de ciclos que la onda completa por segundo, medida en hertzios (Hz). La longitud de onda es la distancia entre dos puntos equivalentes en ciclos consecutivos de la onda. En el ámbito de los ultrasonidos médicos, las frecuencias típicas se encuentran entre 2 y 20 MHz. Las frecuencias más altas permiten ver detalles más claros en las imágenes, pero no pueden penetrar tan profundamente en el cuerpo. En cambio, las frecuencias más bajas pueden llegar más lejos dentro del cuerpo, pero las imágenes resultantes no son tan nítidas [1].

La amplitud de una onda de ultrasonido está estrechamente relacionada con su energía, se mide mediante la presión máxima que la onda ejerce en el medio a través del cual se desplaza. La velocidad del ultrasonido varía depende del medio donde se encuentre, siendo aproximadamente 1540 m/s en tejidos blandos humanos. Esta velocidad es utilizada por los equipos de ultrasonido para que calculen las distancias y generen imágenes basadas en el tiempo que tardan las ondas en reflejarse de vuelta al transductor [1].

Los cristales piezoeléctricos de los transductores producen ultrasonidos. La corriente alterna aplicada a estos cristales genera ondas sonoras que luego se propagan a través de los tejidos del cuerpo. Los cristales piezoeléctricos tienen la capacidad de emitir y recibir sonido, lo cual es fundamental para obtener imágenes por ultrasonido [1].

Las ondas de ultrasonido viajan a través de los tejidos y provocan diferentes fenómenos. La reflexión ocurre cuando las ondas de ultrasonido encuentran interfaces entre tejidos con impedancias acústicas variables, reflejando una parte de la onda de regreso al transductor. Las ondas reflejadas son esenciales para obtener una imagen de la estructura interna del cuerpo, el ejemplo visual lo tenemos en la Figura 1. La refracción, por otro lado, es el cambio de dirección de las ondas de ultrasonido cuando viajan oblicuamente entre tejidos con diferentes velocidades de propagación, como se ilustra en la Figura 2. Las imágenes de ultrasonido pueden presentar artefactos debido a la refracción [1].

La atenuación es la disminución de la intensidad de las ondas de ultrasonido a medida que viajan a través de los tejidos. Esta disminución es causada por la absorción, la reflexión, la dispersión y la refracción de las ondas. La atenuación es una función de la frecuencia de la onda y las características del medio. Las ondas de alta frecuencia tienen una menor capacidad de penetración debido a su mayor atenuación [1].

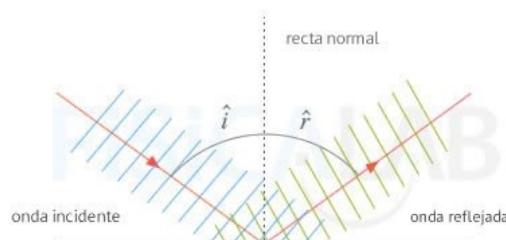


Figura 1. Fenómeno de reflexión

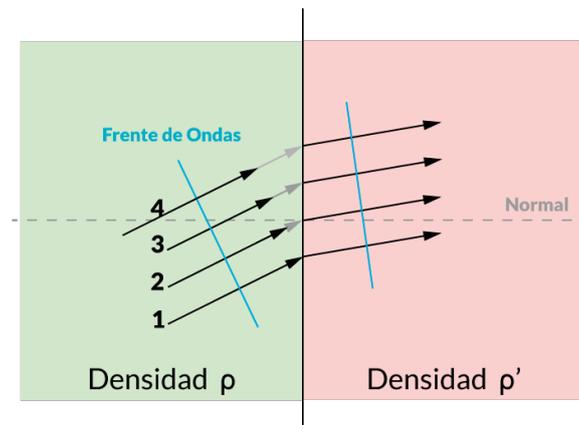


Figura 2. Fenómeno de refracción

Los ultrasonidos tienen numerosas aplicaciones tanto en tecnología como en medicina, destacando por su versatilidad y seguridad. En tecnología, se utilizan para la detección de defectos en materiales mediante inspección no destructiva, en limpieza ultrasónica y en sistemas de medición de distancia y velocidad. En medicina, se utilizan para diagnóstico por imágenes, terapia ultrasónica y en investigación biomédica [1].

## 1.1 Concepto y Tipos de Lentes Acústicas

Las lentes acústicas son dispositivos diseñados para manipular la propagación de ondas sonoras, permitiendo su enfoque, dirección y modulación, funcionan manipulando la trayectoria de las ondas sonoras mediante la refracción o la difracción. Estas lentes son capaces de enfocar los frentes de onda entrantes a puntos focales opuestos a su dirección de entrada, lo que les permite operar en una banda de frecuencia más amplia que los dispositivos difractivos convencionales. Las lentes acústicas se diseñan y fabrican utilizando herramientas CAD y técnicas de impresión 3D para optimizar sus propiedades acústicas. Estas herramientas permiten ajustar y organizar las células unitarias del metamaterial en estructuras tridimensionales específicas para frecuencias objetivo [2]. Existen varios tipos de lentes acústicas, cada una con sus características específicas basadas en los fenómenos físicos que emplean. Estas lentes se pueden dividir en dos categorías principales: lentes refractivas y lentes difractivas.

### 1.1.1 Lentes Refractivas

Las lentes refractivas son aquellas que desvían las ondas sonoras a través de la refracción, similar a cómo funcionan las lentes ópticas. Un tipo notable de lente refractiva es la lente de cristal sónico, que utiliza una distribución periódica de cilindros rígidos para manipular la velocidad del sonido dentro del cristal. Estas lentes son efectivas para enfocar ondas acústicas debido a la variación controlada del índice de refracción dentro de la lente [3]. Otro ejemplo son las lentes de índice de gradiente (GRIN), que logran una variación continua del índice de refracción mediante estructuras laberínticas (ver Figura 3). Este tipo de lentes permite un control preciso sobre la dirección y el enfoque de las ondas

acústicas, lo que las hace ideales para aplicaciones que requieren una modulación detallada del haz sonoro [3].

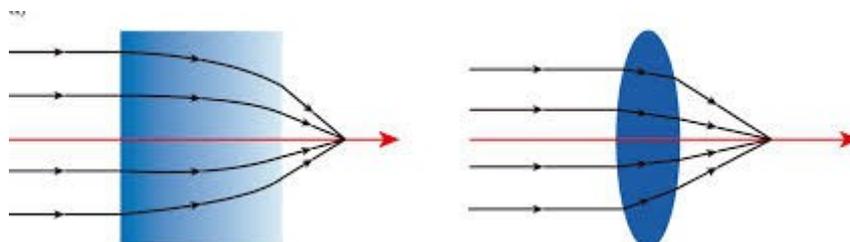


Figura 3. Dibujo de una lente de gradiente modelando una onda mediante refracción

### 1.1.2 Lentes Difractivas

Las lentes difractivas tienen una historia que se remonta a los estudios iniciales sobre la difracción de la luz. En el siglo XVII, Francesco Maria Grimaldi fue uno de los primeros en describir el fenómeno de la difracción, observando que la luz, al pasar por una rendija estrecha, no se propagaba en líneas rectas como se esperaba, sino que se curvaba y se dispersaba, creando patrones de interferencia [4].

Fue en el siglo XIX cuando Augustin-Jean Fresnel desarrolló una teoría matemática completa de la difracción. Esta teoría permitió el diseño de lentes difractivas más sofisticadas, las cuales podían concentrar y dirigir la luz de manera eficiente. Las contribuciones de Fresnel marcaron un punto de inflexión en la óptica, estableciendo las bases para el desarrollo de las lentes difractivas modernas [4].

En el siglo XX, con el avance de la tecnología de fabricación de microestructuras, las lentes difractivas comenzaron a encontrar aplicaciones prácticas en diversas áreas. Los desarrollos en litografía y otras técnicas de microfabricación permitieron la creación de lentes difractivas con patrones de difracción extremadamente precisos, lo que mejoró significativamente su eficiencia y funcionalidad [4].

Hoy en día, las lentes difractivas se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, desde la oftalmología hasta la comunicación óptica. En oftalmología, por ejemplo, se emplean en lentes intraoculares multifocales para la corrección de la presbicia y la catarata, permitiendo a los pacientes enfocar objetos a diferentes distancias y mejorando su calidad de vida después de la cirugía ocular [5].

La capacidad de las lentes difractivas para corregir aberraciones cromáticas y su versatilidad en el diseño han ampliado su uso en sistemas de imagenología, comunicación óptica y diversas aplicaciones industriales y científicas. Estos desarrollos han sido posibles gracias a los continuos avances en la tecnología de fabricación y al profundo entendimiento de la difracción de la luz [5].

Las lentes difractivas basan su funcionamiento en las interferencias constructivas del campo de presión. Un ejemplo prominente de este tipo de lentes son las lentes fractales, que generan múltiples focos basándose en sus propiedades geométricas fractales. Estas lentes son capaces de enfocar ondas acústicas de manera muy precisa gracias a la manipulación de las interferencias [3].

Una de las características más destacadas de las lentes difractivas es su capacidad para ser extremadamente delgadas y ligeras. Debido a que los elementos difractivos pueden estar compuestos de películas muy finas, a menudo de solo unos pocos micrómetros de

espesor, estas lentes pueden integrarse en dispositivos donde el espacio y el peso son críticos. Por ejemplo, en dispositivos médicos y tecnológicos donde se requiere una alta precisión sin agregar volumen significativo [5]

Las lentes de Fresnel planas, conocidas como Fresnel Zone Plates (FZP) son otro tipo de lente difractiva que alterna zonas transparentes y bloqueantes para mejorar la capacidad de focalización. Las FZP son particularmente efectivas en aplicaciones de ultrasonido debido a su capacidad para enfocar ondas acústicas de manera eficiente. Los patrones de difracción pueden ser ajustados para crear lentes con propiedades específicas, como la capacidad de generar múltiples focos o de distribuir la luz de manera uniforme a través de una superficie. Esta flexibilidad en el diseño permite a los ingenieros y científicos crear soluciones ópticas personalizadas para una amplia variedad de aplicaciones [5].

## 1.2 Comparación entre Lentes Difractivas y Lentes Acústicas Tradicionales

Las lentes difractivas, en la Figura 4, la lente 1 y las lentes acústicas tradicionales, también en la Figura 4, la lente 2, difieren significativamente tanto en sus principios de funcionamiento como en sus aplicaciones. Mientras que las lentes difractivas utilizan patrones de difracción para desviar la luz, las lentes acústicas tradicionales, como las lentes de cristal sónico y las lentes de índice de gradiente (GRIN), se basan en la refracción de ondas acústicas a través de medios materiales.

Las lentes difractivas son más ligeras y compactas debido a sus estructuras delgadas. Esta característica es una ventaja en aplicaciones donde el espacio y el peso son factores críticos, como en dispositivos portátiles y en sistemas ópticos complejos que requieren alta precisión y bajo peso. Por otro lado, las lentes acústicas tradicionales suelen ser más robustas y pueden manejar mayores intensidades de onda sin sufrir degradación significativa. Esto las hace ideales para aplicaciones industriales y médicas donde la durabilidad y la resistencia son esenciales [6] [7].

Una ventaja significativa de las lentes difractivas es su capacidad para corregir la aberración cromática. Las lentes acústicas tradicionales no tienen esta capacidad debido a sus diferentes mecanismos de funcionamiento. Sin embargo, las lentes difractivas pueden diseñarse para minimizar la dispersión cromática, lo que mejora la calidad de la imagen en aplicaciones ópticas avanzadas. A pesar de estas ventajas, las lentes difractivas pueden presentar limitaciones en aplicaciones de banda ancha debido a la dispersión cromática inherente a su mecanismo de difracción. Para mitigar estos efectos, se pueden diseñar estructuras híbridas que combinan elementos refractivos y difractivos [8].

En términos de aplicaciones, las lentes difractivas se utilizan ampliamente en la corrección de la presbicia y en la fabricación de lentes intraoculares multifocales para cirugía refractiva. Estas lentes proporcionan múltiples puntos focales, mejorando la visión a diferentes distancias y corrigiendo la visión de cerca y de lejos simultáneamente. En comparación, las lentes acústicas tradicionales se utilizan principalmente en la formación de imágenes médicas y en aplicaciones industriales donde es más necesaria la manipulación precisa de ondas acústicas [8].

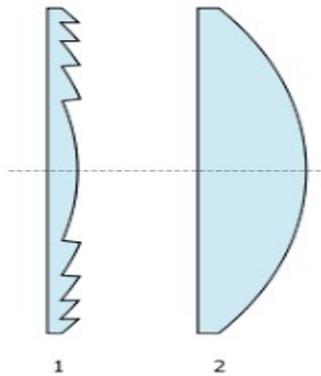


Figura 4. Una lente de Fresnel (1) y una lente convencional (2)

### 1.3 Proceso de Diseño de una Lente de Fresnel

El diseño de una lente de Fresnel comienza con la determinación de los requisitos ópticos específicos de la aplicación, como el punto focal, el ángulo de incidencia de la luz y la eficiencia de transmisión requerida. Una vez establecidos estos parámetros, se utiliza software de diseño asistido por computadora (CAD) para modelar la lente. El diseño implica la creación de un perfil segmentado que simula la curvatura de una lente convencional mediante una serie de pasos anulares. Cada segmento se diseña para refractar la luz hacia el punto focal deseado [9].

El siguiente paso en el proceso de diseño es la simulación y optimización del rendimiento óptico de la lente. Esto se realiza utilizando técnicas de trazado de rayos y algoritmos de optimización que ajustan los parámetros del diseño para maximizar la eficiencia de enfoque y minimizar las aberraciones ópticas. Las simulaciones permiten prever el comportamiento de la lente bajo diferentes condiciones de iluminación, asegurando que cumpla con los requisitos de la aplicación antes de pasar a la fase de fabricación [9].

#### 1.3.1 Materiales Utilizados en la Fabricación

Los materiales empleados en la fabricación de lentes de Fresnel han evolucionado a lo largo del tiempo, buscando un equilibrio entre propiedades ópticas, costo y facilidad de producción. Al principio, fue escogido el vidrio como material principal para la fabricación, pero su peso y fragilidad limitaban su aplicación. Actualmente, los plásticos como el acrílico, PMMA, PVC y policarbonato dominan el mercado gracias a su ligereza, bajo costo y facilidad de moldeo. En aplicaciones específicas que demandan alta resistencia térmica o propiedades ópticas especiales, se pueden utilizar otros materiales como metales o incluso resinas fotosensibles para la fabricación mediante litografía. La elección final del material dependerá de factores como la aplicación prevista, los requerimientos ópticos, el presupuesto y la durabilidad deseada [10].

#### 1.3.2 Técnicas de Fabricación

La idea de la lente Fresnel se desarrolló por primera vez en el siglo XVIII como una forma de crear anillos anulares y un perfil curvo. Este perfil formaría entonces una lente curva convencional. La «alta intensidad de ranura» permite un mejor rendimiento de enfoque y

una captura de imágenes de mayor calidad en comparación con las lentes estándar. La forma con la que se fabricaron las primeras lentes Fresnel fue a través de una molienda prolongada de vidrio a mano para luego ser pulida. El proceso avanzó al verter vidrio fundido en moldes hasta el desarrollo, en el siglo XX, del moldeo por inyección de plásticos de calidad óptica; estos avances han hecho que la lente Fresnel sea más práctica para aplicaciones comerciales [11]

## **1.4. Aplicaciones**

### **1.4.1 Imágenes**

La energía solar se utiliza en la creación de imágenes a través de la alimentación de dispositivos como cámaras digitales, teléfonos móviles y otros equipos electrónicos. Los paneles solares pueden generar la electricidad necesaria para cargar baterías y mantener estos dispositivos operativos en áreas remotas o en situaciones donde no hay acceso a la red eléctrica. [10]

### **1.4.2. Fotografía**

En el ámbito de la fotografía, la energía solar puede ser utilizada para alimentar cámaras, flashes y otros equipos en exteriores. Esto es especialmente útil en sesiones fotográficas en lugares alejados, donde no se dispone de energía eléctrica. Además, se utilizan paneles solares portátiles para mantener el equipo cargado durante largas sesiones. [10]

### **1.4.3. Iluminación:**

La iluminación es uno de los usos más comunes de la energía solar. Se emplean lámparas solares para iluminar espacios exteriores, como jardines, calles y parques. Estas lámparas capturan la energía del sol durante el día y la almacenan en baterías, permitiendo su uso durante la noche. Además, se utilizan sistemas de iluminación solar en áreas rurales sin acceso a la red eléctrica. [10]

### **1.4.4. Proyección:**

En eventos al aire libre o en lugares sin acceso a la electricidad, la energía solar se utiliza para alimentar proyectores. Estos sistemas solares pueden ser portátiles y permiten la realización de presentaciones, proyecciones de películas o eventos en lugares remotos, sin depender de generadores de combustibles fósiles. [10]

### **1.4.5. Energía Solar:**

La energía solar, capturada mediante paneles fotovoltaicos, convierte la luz solar en electricidad. Esta energía se puede utilizar para una variedad de aplicaciones, desde alimentar hogares y edificios hasta cargar dispositivos electrónicos, iluminación, y sistemas de proyección. La energía solar es una fuente limpia y renovable, que reduce la dependencia de combustibles fósiles y disminuye la huella de carbono. [10]

## 1.5 Introducción a las Series Numéricas

Una serie numérica es una secuencia de números ordenados, conocidos como términos, que siguen un patrón o regla específica de formación. Este patrón puede ser simple, como una suma o resta constante entre términos consecutivos, o más complejo, como multiplicaciones, divisiones, o incluso funciones polinomiales. La característica clave de una serie numérica es que cada término tiene una relación definida con el anterior, lo que permite predecir o calcular los términos subsiguientes basándose en esta regla. [12]

Existen muchos ejemplos de series numéricas. Una serie simple podría ser 5, 10, 15, 20, 25, donde cada término se obtiene sumando 5 al anterior, lo que indica una progresión aritmética. Otro ejemplo es la serie 2, 4, 8, 16, 32, donde cada término es el doble del anterior, formando así una progresión geométrica. También podemos encontrar series como 1, 4, 9, 16, 25, donde cada término es un cuadrado perfecto, lo que ejemplifica una serie polinomial cuadrática. [12]

Las series numéricas se pueden clasificar de diversas maneras. Según la cantidad de términos, pueden ser finitas, que tiene un inicio y un fin claros, o infinitas, como la serie de números naturales, que no tiene un final definido. También se pueden clasificar según el orden de los elementos: en series ascendentes, donde los términos van de menor a mayor; descendentes, donde van de mayor a menor; o alternadas, donde los términos aumentan y disminuyen de manera alterna. [12]

Las series numéricas tienen múltiples aplicaciones en diversas áreas como la ciencia, la ingeniería y la economía. Son herramientas útiles para modelar situaciones reales, prever comportamientos futuros y resolver problemas complejos. En el contexto educativo, las series numéricas ayudan a mejorar la agilidad mental y la capacidad de resolver problemas de los estudiantes, como en ejercicios donde se debe identificar y aplicar el patrón de una serie para completar los términos faltantes. Además, en la investigación científica y económica, las series numéricas permiten analizar datos y detectar patrones que pueden llevar a descubrimientos importantes, como modelar el crecimiento de poblaciones animales en biología o analizar tendencias económicas. [12]

### 1.5.1 Aplicación de Series Numéricas en el Diseño de Lentes Acústicas

El uso de series numéricas en el diseño de lentes acústicas se centra en la optimización de sus propiedades acústicas. Este proceso implica el ajuste de parámetros geométricos y materiales utilizando algoritmos de optimización y principios de reciprocidad [13].

Este enfoque explora cómo los algoritmos de optimización, junto con el principio de reciprocidad, se utilizan para diseñar lentes acústicas de banda ancha. La optimización numérica ajusta parámetros como la geometría y el material de las lentes para maximizar su eficiencia de transmisión y capacidad de enfoque. Este enfoque permite diseñar lentes que operan eficazmente en una amplia gama de frecuencias, mejorando su aplicabilidad en campos como la imagenología médica y los sistemas de sonar [13].

El uso de series numéricas en la optimización permite ajustar parámetros geométricos y materiales, asegurando que las lentes acústicas logren un enfoque preciso y eficiente. La optimización numérica basada en series aritméticas y geométricas permite crear diseños que operan eficientemente en una amplia gama de frecuencias, lo cual es importante para aplicaciones en imagenología médica y sistemas de sonar [13].

## 1.5.2 Ejemplos de Series Numéricas Utilizadas

En el diseño de lentes acústicas, se utilizan diversas series numéricas para calcular y ajustar los parámetros de diseño. Estas series pueden incluir secuencias aritméticas, geométricas y patrones más complejos basados en modelos matemáticos avanzados.

Un ejemplo detallado se encuentra en el diseño de lentes acústicas bianisotrópicas, donde se utilizan series numéricas para determinar la altura, longitud y ángulo de las guías de onda necesarias para generar el enfoque deseado. Las simulaciones numéricas permiten predecir y optimizar el comportamiento de enfoque de estas lentes, demostrando cómo las series numéricas pueden ser fundamentales en la creación de dispositivos acústicos avanzados. Este método asegura que cada elemento de la lente contribuya de manera óptima al enfoque y dirección de las ondas acústicas, resultando en una mayor precisión y eficacia [14]

La serie aritmética ha sido utilizada para definir distribuciones lineales de elementos en la lente, donde cada elemento se coloca a una distancia constante del anterior. Esta serie es sencilla y eficaz para aplicaciones básicas de enfoque. Asimismo, la serie geométrica ha sido empleada para distribuir elementos con una progresión geométrica, lo que permite una variación gradual de parámetros como el espesor o el ángulo de los elementos. Esta serie es útil para diseñar lentes con transiciones suaves y controladas [14].

## 1.5.3 Introducción a los Números Primos

Los números primos son aquellos números naturales mayores que 1 que no pueden ser divididos exactamente por ningún otro número excepto por 1 y por sí mismos. Ejemplos comunes incluyen 2, 3, 5, 7, 11 y 13, se pueden observar coloreados de color rosa los primeros primos entre los primeros 100 números en la Figura 5. Estos números son fundamentales en matemáticas debido a su papel como bloques de construcción de los números enteros, dado que cualquier número entero mayor que 1 puede expresarse como un producto único de números primos, según el Teorema Fundamental de la Aritmética [15].

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

Figura 5. Los primos en rosa dentro de los 100 primeros números

Los números primos son indivisibles, es decir, solo tienen dos divisores: 1 y el mismo número. Además, el número 1 no se considera primo porque solo tiene un divisor. La importancia de los números primos radica en su capacidad para descomponer números enteros en sus factores primos únicos, lo cual es esencial para diversas aplicaciones matemáticas y tecnológicas [15].

#### 1.5.4 Aplicaciones de los Números Primos

Los números primos y compuestos son conceptos fundamentales en matemáticas con aplicaciones prácticas en diversos campos. Desde la criptografía hasta la informática, estos números desempeñan un papel esencial en diferentes áreas. Comprender cómo se utilizan los números primos y compuestos en la vida real nos permite apreciar su relevancia más allá de las matemáticas teóricas [16].

En criptografía, los números primos son fundamentales para los algoritmos de encriptación modernos, como RSA (Rivest-Shamir-Adleman). La seguridad de estos sistemas se basa en la dificultad de factorizar números compuestos grandes en sus factores primos. Al utilizar números primos como base, los sistemas criptográficos garantizan comunicaciones seguras y protegen información sensible. Por ejemplo, cuando realizas una compra en línea con una tarjeta de crédito, la transacción se cifra mediante un algoritmo que emplea números primos, generando una clave única al multiplicar dos grandes primos. Esta clave cifra los datos, dificultando que los hackers descifren la información sin conocer los factores primos involucrados [16].

En el ámbito de la informática, los números primos y compuestos se aplican en diversas áreas, como algoritmos, estructuras de datos y protocolos de red. Los números primos, por ejemplo, se utilizan en funciones hash para distribuir datos de manera uniforme en servidores o ubicaciones de almacenamiento, garantizando una recuperación y almacenamiento eficiente en sistemas distribuidos o bases de datos. Además, los números primos son clave en los códigos de detección y corrección de errores, permitiendo detectar y corregir errores en datos transmitidos con alta precisión al seleccionar primos específicos como parámetros [16].

En la seguridad de Internet, los números primos son determinantes para asegurar las comunicaciones a través de protocolos como SSL/TLS (Secure Sockets Layer/Transport Layer Security). Estos protocolos emplean algoritmos basados en números primos para establecer conexiones seguras entre navegadores web y servidores. Cuando visitas un sitio web con HTTPS habilitado, tu navegador realiza un "handshake" con el servidor utilizando estos algoritmos, garantizando que los datos intercambiados permanezcan confidenciales y protegidos contra manipulaciones [16].

Por último, la factorización prima, que es el proceso de descomponer un número compuesto en sus factores primos, tiene aplicaciones prácticas en varios campos. En química, por ejemplo, se utiliza para determinar la fórmula empírica de compuestos. Al encontrar los factores primos del peso molecular de una sustancia, los químicos pueden deducir su composición elemental [16].

## 2. Objetivos

El presente Trabajo de Fin de Grado se centra en el estudio y desarrollo de lentes acústicas para la modulación de haces de ultrasonidos, combinando principios de series numéricas con otras tipologías difractivas de lentes. El propósito es modificar la capacidad de focalización y precisión de los haces ultrasónicos, que son especialmente críticos en otras aplicaciones médicas y tecnológicas. El uso de las lentes acústicas facilita la focalización y el control de los ultrasonidos de manera más eficiente, mejorando tanto los procesos diagnósticos como terapéuticos. Este trabajo consta de dos partes, un modelado numérico y su validación experimental en condiciones controladas. Para la ejecución de estas partes se utiliza el software comercial COMSOL Multiphysics®, ampliamente utilizado y validado en la comunidad científica, así como un montaje experimental propio del departamento de Física Aplicada de la UPV, también validado.

### 2.1 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es desarrollar una lente de Fresnel, con geometría basada en principios de series numéricas, capaz de modular haces de ultrasonidos.

### 2.2 Objetivos específicos

Para cumplir el objetivo general, se han establecido los siguientes objetivos específicos:  
Estado del arte: Documentación y búsqueda de fuentes bibliográficas para entender los fundamentos teóricos acerca de las lentes ultrasónicas.

Herramientas software de simulación numérica: Aprendizaje del manejo del software comercial COMSOL Multiphysics®, necesario para la simulación de lentes ultrasónicas.  
Herramientas software de impresión 3D: Aprendizaje del manejo del software comercial y uso de la impresora necesario para la implementación real de lentes ultrasónicas.

Herramientas experimentales: Conocer y aprender a utilizar un sistema experimental robotizado de medidas para caracterizar dispositivos acústicos en entorno controlado sumergido.

Desarrollo de diseños propios: Creación de diferentes prototipos de lentes utilizando series numéricas. Simulación en COMSOL Multiphysics® para analizar los resultados obtenidos. Impresión en 3D de la lente diseñada y medidas experimentales con la misma.  
Validación del diseño: Mediante Matlab tratamiento de los datos numéricos y experimentales obtenidos. Resultados finales que validen el diseño realizado.

### 2.3 CRONOGRAMA TEMPORAL

Para el desarrollo y cumplimiento de los objetivos específicos se han establecido una serie de tareas, en la Figura 4 se adjuntan las semanas de cada mes que se han dedicado a las mismas. Siendo una marca ‘s’ corresponde a una de las semanas de forma aproximada.



Tareas	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
Documentación y búsqueda de documentación.	ss	ssss	ssss	s	
Realización de medidas in-situ.				ssss	
Procesado y análisis de datos obtenidos.		s	ssss	ssss	
Extracción de conclusiones.				ss	ssss
Redacción del proyecto y de presentación de defensa.		ssss	ssss	ssss	ssss

Figura 6. Distribución temporal de las tareas

## 3. Metodología

### 3.1 Método de los Elementos Finitos (FEM)

#### 3.1.1 Fundamentos del Método de los Elementos Finitos

El Método de Elementos Finitos permite obtener respuestas para numerosos problemas de ingeniería.

La geometría de la pieza, sometida a cargas y restricciones, se subdivide en partes más pequeñas, conocidas como “elementos”, que representan el dominio continuo del problema. La división de la geometría en pequeños elementos resuelve un problema complejo, al subdividirlo en problemas más simples, lo que permite a la computadora hacer las tareas con eficiencia [17].

El método propone que un número infinito de variables desconocidas, sean sustituidas por un número limitado de elementos de comportamiento bien definido. Esas divisiones pueden tener diferentes formas, tales como triangular, cuadrangular, entre otros, dependiendo del tipo y tamaño del problema. Como el número de elementos es limitado, son llamados de “elementos finitos” – palabra que da nombre al método [17].

Los elementos finitos están conectados entre sí por puntos, que se llaman nodos o puntos nodales. Al conjunto de todos estos ítems – elementos y nodos – se lo denomina malla. Debido a las subdivisiones de la geometría, las ecuaciones matemáticas que rigen el comportamiento físico no se resolverán de una manera exacta, sino aproximada por este método numérico. La precisión de los Métodos dos Elementos Finitos depende de la cantidad de nodos y elementos, del tamaño y de los tipos de elementos de la malla. Por lo tanto, cuanto menor sea el tamaño y mayor el número de elementos en una malla, más precisos serán los resultados de los análisis [17].

#### 3.1.2 Aplicaciones del FEM en la Simulación de Fenómenos Físicos

El método puede ser aplicado en la resolución y diagnóstico de problemas de análisis estructural para la obtención de desplazamientos, deformaciones y tensiones, también permite representar diferentes escenarios y evaluar el rendimiento de productos con aplicación de criterios de resistencia, rigidez o fatiga. También las variaciones del método de los elementos finitos permiten hacer análisis térmico, acústico, dinámico, electromagnético y de flujos de los casos más simples de comportamiento lineal al no lineal, como cuando se tienen grandes desplazamientos o contacto entre las partes de un conjunto [17].

Es posible con las tecnologías actuales hacer integraciones con los softwares utilizados en el desarrollo de representación geométrica – conocidos como CAD (*Computer-Aided Design*) – con los sistemas basados en el Método dos Elementos Finitos – llamados de CAE (*Computer-Aided Engineering*). Esa integración permite lograr los mejores resultados con un análisis más eficiente y ágil [17].

#### 3.1.3 Herramientas y Software para el Análisis FEM

Los programas de Análisis de Elementos Finitos cuentan con toda la información sobre los materiales involucrados en un diseño. Esta información junto a otros datos sobre la pieza y las circunstancias a la que vamos a exponerla, componen una ecuación diferencial

multivariable (es decir, que tiene en cuenta muchas situaciones/variables desconocidas) y sus derivadas parciales (cada una de ellas analizadas por separado) [18].

Se trata de una ecuación diferencial parcial, de gran complejidad para resolver a mano, pero “sencilla” para un programa informático. El software recrea la pieza en 3D y la analiza por partes [18].

Una malla, parecida a una tela de araña, divide en pequeños segmentos la pieza en 3D. Pero no todos tienen el mismo tamaño. Las zonas interiores o los puntos de mayor estrés o fractura, las esquinas... Son zonas delicadas que deben analizarse en profundidad. La malla aquí presenta trocitos más pequeños formando una telaraña muy densa [18].

Cada uno de estos trozos será analizado por separado a través de ecuaciones diferenciales parciales. Se trata de un análisis matemático del comportamiento de la pieza diseñada en cada zona [18].

Así se pueden corregir errores antes de su fabricación. Crear un modelo resistente o elástico... De tal manera, que convierte al diseño en un modelo eficiente porque ya ha sido verificado de antemano. Por eso, se considera que los programas de Análisis de Elementos Finitos resuelven problemas de mecánica estructural, entre otras cosas [18].

Para nuestro experimento específico en el diseño y creación de una lente de Fresnel, utilizaremos COMSOL Multiphysics. COMSOL es una herramienta que permite realizar simulaciones multifísicas integradas, lo que es esencial para modelar el comportamiento complejo de las ondas acústicas en lentes difractivas. COMSOL ofrece módulos especializados para acústica, transferencia de calor y electromagnetismo, permitiendo una simulación detallada y precisa de todos los aspectos del diseño.

Además de los softwares comerciales, también existen herramientas de software libre y de código abierto que se utilizan para el análisis FEM. Entre estas se encuentran FreeFem++, Code\_Aster y Elmer. Estas herramientas ofrecen una alternativa accesible para investigadores y estudiantes, permitiendo realizar análisis FEM sin los costos asociados a los softwares comerciales.

## 3.2 Parámetros de Conformación Focal

### 3.2.1 Definición y Cálculo de la Ganancia Focal

La ganancia focal es un parámetro fundamental en el diseño de sistemas de enfoque, incluyendo lentes ópticas y acústicas. Se define como la relación entre la intensidad de la señal en el punto focal y la intensidad de la señal en una referencia estándar. Este parámetro mide la capacidad de una lente para concentrar la energía en un punto específico, lo cual es esencial para aplicaciones que requieren alta precisión y resolución [19].

El cálculo de la ganancia focal puede realizarse mediante varias técnicas. Una de las más comunes es medir la intensidad de la señal en el punto focal y compararla con la intensidad de una señal de referencia [19].

El proceso de cálculo de la ganancia focal implica la medición precisa de la intensidad de la señal en el punto focal utilizando sensores adecuados, como fotodetectores en sistemas ópticos o hidrófonos en sistemas acústicos. La referencia estándar utilizada para estas mediciones puede variar según el contexto de la aplicación, pero generalmente se utiliza una fuente isotrópica que emite señales de intensidad conocida y constante. Este proceso permite la comparación directa de la intensidad focalizada con la intensidad de referencia, proporcionando un valor claro de la ganancia focal [19].

### 3.2.2 Full Width at Half Maximum (FWHM) y Full Length at Half Maximum (FLHM).

El Full Width at Half Maximum (FWHM) y el Full Length at Half Maximum (FLHM) son parámetros críticos que describen la resolución de un sistema de enfoque.

**FWHM:** El "ancho completo a la mitad del máximo" es una medida del ancho de una distribución de intensidad en el punto donde la intensidad es máxima. Se suele emplear para determinar el ancho de una línea espectral o el rango de longitudes de onda en luz monocromática.

El FWHM es una buena medida de la nitidez o resolución de una imagen. A medida que las condiciones se vuelven borrosas para ver, enfocar o guiar la calidad, el ancho se expande en relación. Cuanto menor sea el valor de FWHM, mejor será la imagen (esencialmente, más nítida). Si dos picos tienen FWHM superpuestos, no se podrán resolver, es decir, se verán como un solo pico [20].

**FLHM:** Similar al FWHM, pero se aplica a la longitud del haz en el eje focal. Se mide como la distancia a lo largo del eje focal donde la intensidad del haz es la mitad de su valor máximo. Este parámetro es determinante para aplicaciones que requieren una precisión longitudinal en la focalización.

Estos parámetros son esenciales para evaluar la capacidad de un sistema de enfoque para concentrar energía en un área específica y son ampliamente utilizados en aplicaciones de imagenología médica, telecomunicaciones y diseño de lentes ópticas y acústicas.

## 3.3 Métodos de Medición y Evaluación de los Parámetros Focales

La medición y evaluación de los parámetros focales, como la ganancia focal, FWHM y FLHM, requieren el uso de equipos y técnicas especializadas. Los métodos más comunes incluyen:

**Análisis de Imágenes:** Utilizando cámaras de alta resolución y software de procesamiento de imágenes, es posible medir la distribución de la intensidad en el plano focal. Este método es particularmente útil para evaluar el FWHM y el FLHM en sistemas ópticos y acústicos. Las imágenes capturadas se analizan para determinar los puntos donde la intensidad cae al 50% del valor máximo, permitiendo el cálculo preciso de estos parámetros. Este método permite una visualización directa y detallada de la distribución de la intensidad, facilitando la evaluación de la calidad del enfoque [50].

**Medición Directa de Intensidad:** Utilizando sensores de intensidad, como fotodetectores o hidrófonos, se puede medir directamente la intensidad de la señal en diferentes puntos del plano focal. Estos sensores se posicionan en varios puntos a lo largo del eje focal y en el plano transversal para recoger datos sobre la distribución de la intensidad. Los datos obtenidos se utilizan para calcular la ganancia focal y los parámetros de resolución. Este método es particularmente efectivo en entornos controlados donde se requiere una alta precisión en la medición [48].

**Simulación Computacional:** Utilizando software de simulación, como COMSOL Multiphysics, se pueden modelar los sistemas de enfoque y predecir los parámetros focales. Las simulaciones permiten evaluar el rendimiento de diferentes diseños antes de su implementación física, lo que es crucial para optimizar el diseño y mejorar la precisión de los sistemas de enfoque. Esta técnica es altamente efectiva para realizar estudios de



viabilidad y pruebas de concepto sin necesidad de construir prototipos físicos, ahorrando tiempo y recursos en el proceso de desarrollo.

Estos métodos proporcionan datos precisos y confiables sobre los parámetros focales, permitiendo la optimización y mejora de los sistemas de enfoque en diversas aplicaciones tecnológicas y científicas.

Para una correcta evaluación de los parámetros focales, es fundamental seguir procedimientos estandarizados y utilizar equipos calibrados. La precisión en la medición de la intensidad de la señal y la correcta interpretación de los resultados son esenciales para garantizar la fiabilidad de los datos obtenidos. Los métodos de medición deben adaptarse a las características específicas del sistema en estudio y a las condiciones del entorno en el que se realizan las mediciones, asegurando así la validez y reproducibilidad de los resultados.

## 4. Modelo numérico

### 4.1 Introducción de COMSOL Multiphysics®

El avance tecnológico en el ámbito de la simulación numérica ha revolucionado la forma en que comprendemos y abordamos problemas complejos en diversas disciplinas científicas y de ingeniería. En este contexto, COMSOL Multiphysics® se ha consolidado como una herramienta fundamental para la modelización y simulación de fenómenos físicos en un amplio rango de campos, desde la mecánica de fluidos hasta la electromagnética y la transferencia de calor.

COMSOL Multiphysics® es un software de simulación multifísica líder en el mercado, que proporciona una plataforma integrada para resolver ecuaciones diferenciales parciales (EDP) mediante el método de elementos finitos. Su capacidad para modelar sistemas complejos y acoplar diferentes fenómenos físicos lo convierte en una herramienta versátil y poderosa para investigadores, ingenieros y científicos de todo el mundo.

Tras el análisis teórico explicado en la sección anterior, se va a diseñar una lente de Fresnel con una geometría basada en la sucesión de números primos impresa en 3D y simulada numéricamente. Se explorará el potencial de COMSOL Multiphysics® para abordar este problema. Este software nos permitirá analizar y comprender la física que subyace en este tipo de dispositivos ultrasónicos.

Para conseguir esta solución desde un punto de vista numérico, se llevará a cabo un proceso de construcción y configuración del modelo utilizando COMSOL Multiphysics®, desde la creación de geometrías hasta la definición de materiales y condiciones de contorno. Se realizarán simulaciones numéricas para obtener resultados cuantitativos y cualitativos, los cuales serán analizados y comparados con datos experimentales o teóricos, contribuyendo así al avance del conocimiento en el área de estudio. Se va a proceder en el siguiente apartado a realizar un análisis de los pasos necesarios para la creación del modelo numérico mediante COMSOL Multiphysics®.

### 4.2 Creación modelos numéricos mediante COMSOL Multiphysics®.

Esta sección se centra en la construcción y ajuste de modelos. Permite la creación de la geometría, importar materiales y configurar sus propiedades, asignar condiciones de contorno y un apartado de parámetros configurable. Aquí, podemos crear una representación virtual de sí mismos de su sistema físico.

Lo primero es el tamaño espacio. Se eligió un modelo 2D axisimétrico para trabajar con reducir los grados de libertad, si bien con un modelo 3D el cálculo podría dar resultados más exactos, el uso de este modelo más simple es preciso, ya que la lente es axialmente simétrica, hace agilizar el tiempo de cálculo y ahorrar en costes computacionales.

### 4.2.1 Construcción del modelo.

Como se puede apreciar en la Figura 7, para la creación de un modelo en el COMSOL se basa en varias etapas, desde la descripción de parámetros globales hasta el estudio del conjunto del modelo implementado. Esto nos permite simular y analizar distintos fenómenos físicos y entender su funcionamiento.

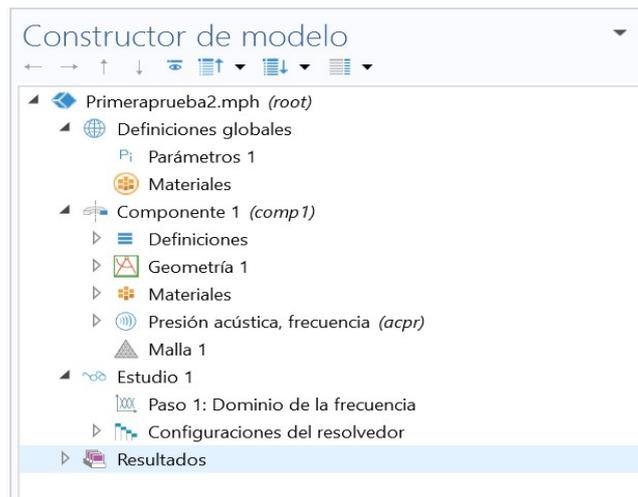


Figura 7. Pantalla Constructor de modelo del Comsol

La capacidad de ajustar los parámetros de la herramienta nos brinda la flexibilidad necesaria para modificar su comportamiento y observar las disparidades resultantes en función de las entradas proporcionadas en cada una de sus fases. Este ajuste de parámetros implica la modificación de variables internas que afectan directamente el proceso de la herramienta, lo que permite adaptar su funcionamiento a diversas condiciones y requisitos específicos. Al manipular estos parámetros, podemos analizar cómo cambian los resultados generados por la herramienta en diferentes escenarios, lo que facilita la optimización y el refinamiento del rendimiento de la misma según las necesidades del usuario o los criterios predefinidos.

### 4.2.2 Definiciones globales

El primer apartado que nos encontramos es el de definiciones globales. En este tenemos dos subapartados, el de parámetros y el de material.

Ajustes  
Parámetros

Etiqueta: Parámetros 1

Parámetros

Nombre	Expresión	Valor	Descri
h_host	0.5	0.5	
freq	250E3	2.5E5	
b_host	0.25	0.25	
rho_water	1000	1000	
c_water	1500	1500	
lambda	c_water/freq	0.006	
Fl	8.33*lambda	0.04998	
r1	sqrt(1*lambda*...	0.017575	
h_th	0.001	0.001	
r2	sqrt(2*lambda*...	0.025214	
r3	sqrt(3*lambda*...	0.031315	
r4	sqrt(4*lambda*...	0.036654	
r5	sqrt(5*lambda*...	0.041526	
r6	sqrt(6*lambda*...	0.046079	

Figura 8. Subapartado de Parámetros en COMSOL

En nuestro caso nos interesaremos en el de parámetros, es esta fase se pueden definir parámetros globales facilitando la inclusión de nuevos parámetros o fórmulas, como se ilustra en la Figura 8. Esta característica simplifica la revisión y modificación de los modelos, ya que el programa permite la definición de parámetros basados en variables globales, siguiendo un enfoque similar al utilizado en programación.

### 4.2.3 Geometría

En COMSOL, la fase de geometría es fundamental para crear modelos numéricos que representen sistemas físicos reales. Los usuarios cuentan con una amplia gama de herramientas para construir y configurar geometrías para cumplir con las especificaciones de sus estudios y simulaciones.

Además de las geometrías simples que se pueden crear directamente dentro de COMSOL, el software ofrece la capacidad de gestionar geometrías más complejas importando archivos en formatos CAD vectoriales. Esto permite a los usuarios trabajar con diseños detallados y específicos, sin tener que reconstruirlos desde cero en la plataforma de simulación.

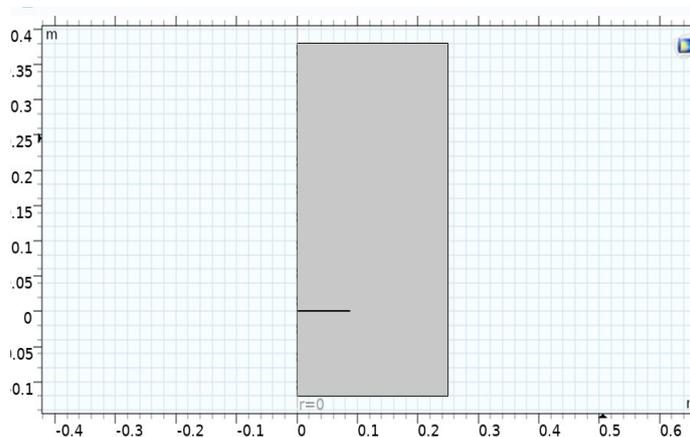


Figura 9. Imagen de nuestra geometría en COMSOL

En nuestro modelo, representado en la Figura 9, es un modelo axisimétrico 2D en COMSOL Multiphysics®, en el cual diseñamos un rectángulo con un radio de rotación de  $r=0$ . Esto permite la rotación en ambos sentidos, tanto horario como anti horario. Primero, diseñamos un rectángulo en el modelo, al que llamé 'host', ubicado de manera central en una de las esquinas. Este rectángulo funciona como un canal o guía a lo largo del cual la onda se propaga desde la parte inferior hasta la superior, simulando la forma de un cilindro.

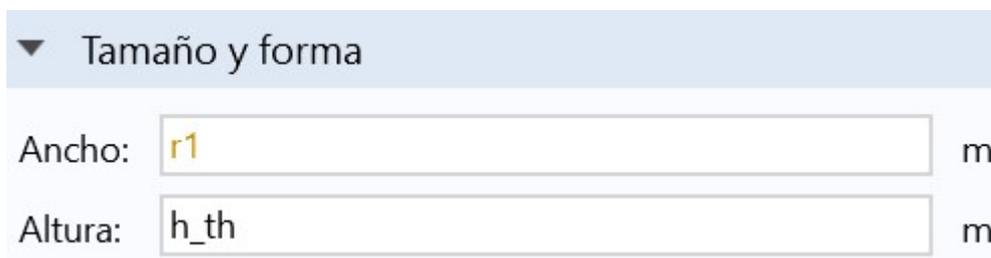
A continuación, añadimos 16 radios a la lente, asignando los anchos según los cálculos de la zona de Fresnel. Finalmente, para este modelo, también quisimos simular una onda plana que incide de manera aproximada. Para modelar un transductor con contornos de presión, dividimos el dominio en varias partes utilizando puntos en el borde del rectángulo exterior como referencia.

Tabla 1. Ecuación y valor de cada uno de los 16 radios

<b>r2</b>	<b><math>\text{sqrt}(2*\lambda*F+(\lambda)^2)</math></b>	<b>0.025214</b>
<b>r3</b>	<b><math>\text{sqrt}(3*\lambda*F+(3*\lambda/2)^2)</math></b>	<b>0.031315</b>
<b>r4</b>	<b><math>\text{sqrt}(4*\lambda*F+(4*\lambda/2)^2)</math></b>	<b>0.036654</b>
<b>r5</b>	<b><math>\text{sqrt}(5*\lambda*F+(5*\lambda/2)^2)</math></b>	<b>0.041526</b>
<b>r6</b>	<b><math>\text{sqrt}(6*\lambda*F+(6*\lambda/2)^2)</math></b>	<b>0.046079</b>
<b>r7</b>	<b><math>\text{sqrt}(7*\lambda*F+(7*\lambda/2)^2)</math></b>	<b>0.0504</b>
<b>r8</b>	<b><math>\text{sqrt}(8*\lambda*F+(8*\lambda/2)^2)</math></b>	<b>0.054544</b>
<b>r9</b>	<b><math>\text{sqrt}(9*\lambda*F+(9*\lambda/2)^2)</math></b>	<b>0.058548</b>
<b>r10</b>	<b><math>\text{sqrt}(10*\lambda*F+(10*\lambda/2)^2)</math></b>	<b>0.06244</b>
<b>r11</b>	<b><math>\text{sqrt}(11*\lambda*F+(11*\lambda/2)^2)</math></b>	<b>0.06624</b>
<b>r12</b>	<b><math>\text{sqrt}(12*\lambda*F+(12*\lambda/2)^2)</math></b>	<b>0.069961</b>
<b>r13</b>	<b><math>\text{sqrt}(13*\lambda*F+(13*\lambda/2)^2)</math></b>	<b>0.073617</b>
<b>r14</b>	<b><math>\text{sqrt}(14*\lambda*F+(14*\lambda/2)^2)</math></b>	<b>0.077216</b>
<b>r15</b>	<b><math>\text{sqrt}(15*\lambda*F+(15*\lambda/2)^2)</math></b>	<b>0.080766</b>
<b>r16</b>	<b><math>\text{sqrt}(16*\lambda*F+(16*\lambda/2)^2)</math></b>	<b>0.084274</b>
<b>r17</b>	<b><math>\text{sqrt}(17*\lambda*F+(17*\lambda/2)^2)</math></b>	<b>0.087744</b>

La Tabla 1 hace referencia al apartado de Parámetros Locales donde añadimos todos los radios para facilitarnos así su implementación en la geometría. Estos 16 radios los utilizamos para la creación de los radios de nuestra lente, Para poder construir un rectángulo, necesitamos tanto su anchura, que en este caso es el radio de cada lente, como su altura, la cual está descrita como “ $h_{th}$ ”, prediseñada en Parámetros Locales, y tiene

el valor de 1 mm, en la Figura 10 vemos el apartado donde metemos directamente las variables.



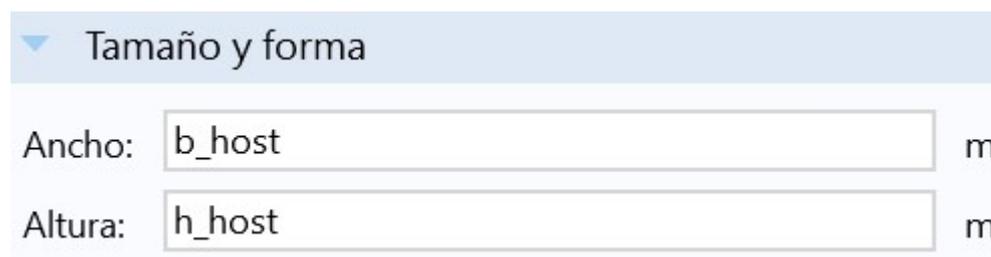
▼ Tamaño y forma

Ancho:  m

Altura:  m

Figura 10. Ancho y alto de nuestro rectángulo

En referencia al rectángulo principal, a nuestro medio o canal descrito antes y apodado como “host” tiene una ancho y altura correspondientes a 25 centímetros, descrito como “b\_host” y una altura de 50 centímetros, nuestro “h\_host”, estas variables, al igual que con el primer rectángulo, las añadimos directamente al apartado que vemos en la Figura 11.



▼ Tamaño y forma

Ancho:  m

Altura:  m

Figura 11. Ancho y alto de nuestro host

Dentro del ámbito de la geometría, se destaca la importancia de la posición. Y, por lo tanto, en ese aspecto, la oportunidad, como mencioné anteriormente, de rotar en ambas direcciones, nos llevó a centrarnos con la lente, y por lo tanto el lado, de nuestro "host" en la mitad, o en  $r=0$ . Para lograr esto, fue necesario retrasar ligeramente el host y situar la lente exactamente en el centro, podemos visualizar como lo conseguimos en las Figuras 12 y 13.



▼ Posición

Base:

r:  m

z:  m

Figura 12. Posición del host

▼ Posición

Base:

r:  m

z:  m

Figura 13. Posición de inicio de los rectángulos que forman la lente

#### 4.2.4 Materiales

Existen dos principales maneras de introducir un material, el propio programa cuenta con una librería interna con datos de materiales ya predefinidos, por otro lado, y en nuestro caso, añadiremos manualmente estos materiales a partir de sus propiedades físicas, los datos necesarios para crear este nuevo material son los que se precisan para resolver la ecuación de Helmholtz en el módulo acústico, en la Figura 14 añadimos los que son los parámetros de densidad y velocidad del sonido del agua:

▶▶	Propiedad	Variable	Valor
<input checked="" type="checkbox"/>	Densidad	rho	rho_water
<input checked="" type="checkbox"/>	Velocidad del sonido	c	c_water

Figura 14. Parámetros de densidad y velocidad del sonido del agua

Valor de los cuáles tenemos definido en los parámetros locales explicado previamente, el agua se ha implementado manualmente con una densidad de  $1000 \text{ kg/m}^3$  y una velocidad del sonido de  $1500 \text{ m/s}$ .

Aunque la lente se podría haber considerado infinitamente rígida a consecuencia de la alta ratio de impedancias entre el agua y el material propio de ella, el latón, he preferido meter manualmente también los datos de este, los podemos observar en la Figura 15:

▶▶	Propiedad	Variable	Valor
<input checked="" type="checkbox"/>	Densidad	rho	rho_laton
<input checked="" type="checkbox"/>	Velocidad del sonido	c	c_laton

Figura 15. Parámetros de densidad y velocidad del sonido del latón

Valores también, añadidos en nuestra carpeta de parámetros locales, siendo estos, la densidad de un valor de  $8400$  y la velocidad del sonido de  $4700$ .

Es importante destacar la necesidad de ajustar la selección para que el material se aplique únicamente sobre las superficies deseadas. Modificaremos los parámetros de selección

para evitar que el material se distribuya de manera uniforme por toda la geometría creada. En este caso, aplicaremos latón a algunos radios y agua a otros, con el objetivo de crear una máscara sobre la lente de Fresnel que simule una disposición basada en números primos.

#### 4.2.5 Mallado

COMSOL Multiphysics® es una herramienta de simulación robusta que ofrece una amplia variedad de técnicas de mallado para geometrías complejas y dominios de diversas formas. Estas técnicas permiten a los usuarios controlar los parámetros de mallado, garantizando simulaciones precisas y eficientes. La discretización del dominio en intervalos de tiempo adecuados es crucial para obtener resultados precisos y maximizar la eficiencia computacional.

En el proceso de mallado, cada elemento creado añade un grado de libertad a la simulación. Es decir, a mayor cantidad de grados de libertad, mayor consumo de recursos. Por lo tanto, simplificar la geometría del problema es fundamental. Aquí está el punto clave: simplificamos el modelo considerando la simetría axial del problema. Hemos optado por un mallado triangular para la discretización del dominio, ya que este tipo de elementos es particularmente efectivo en dominios 2D debido a su capacidad para adaptarse a cualquier forma.

#### 4.2.6 Selección del tamaño de mallado

Seleccionar un tamaño adecuado para los elementos de mallado es una decisión crítica para evitar la dispersión numérica. Hemos decidido establecer un tamaño máximo de elemento de al menos  $\lambda/6$  para asegurar precisión. Desde la versión 6.0 de COMSOL, al definir una frecuencia de operación máxima, el software automáticamente determina el tipo de módulo físico a utilizar y ajusta el tamaño de los elementos en consecuencia.

En nuestra simulación, hemos utilizado una frecuencia de muestreo de 250 kHz, coincidiendo con la frecuencia utilizada en el montaje experimental descrito en el capítulo 5. En agua, esta frecuencia corresponde a una longitud de onda de aproximadamente 6 mm, por lo que hemos establecido el tamaño máximo de los elementos en 1 mm.

#### 4.2.7 Estudio

En este caso, se utilizó COMSOL Multiphysics® para resolver el problema a una frecuencia específica, se podrían haber empleado otras funciones y capacidades que tenía el software, como el análisis de sensibilidad, estudios paramétricos y optimización. Se realizó un análisis en el dominio de la frecuencia con la frecuencia escogida de 250 kHz, definida como "freq" en las definiciones globales.

El Método de los Elementos Finitos (FEM) fue empleado para obtener la solución numérica del problema físico planteado. Este método permitió investigar el comportamiento de la onda respecto a la Soret Zone Plate (SZP) mediante un modelo matemático bajo las condiciones especificadas. El modelo del Problema Acústico de Helmholtz utilizó las siguientes condiciones: una frecuencia de 250 kHz, una velocidad del sonido en el agua de 1500 m/s y una densidad de 1000 kg/m<sup>3</sup>. Como se ha explicado previamente, se podrían haber utilizado los contornos del modelo como límites de radiación para emular un medio infinito y considerar la lente como un elemento



infinitamente rígido, pero se utiliza esta solución, que me iba a dar unos resultados similares, ya que se ve un poco más realista.

## 5. Montaje experimental

### 5.1 Creación del prototipo mediante impresión 3D.

Para la impresión 3D hemos utilizado el software Autodesk® Inventor, con el cual hemos diseñado las lentes. Este nos ha proporcionado un archivo de formato de objeto en 3D, una estereolitografía, guardado en formato .stl. Al no ser compatible con la impresora 3D, para solucionarlo, utilizamos un software de ‘slicing’, que divide nuestro objeto 3D en láminas para poder introducirlo dentro de la impresora, en nuestro caso hemos utilizado el ULTIMAKER CURA, y hemos cargado los parámetros en la impresora, lo podemos observar en la Figura 16.

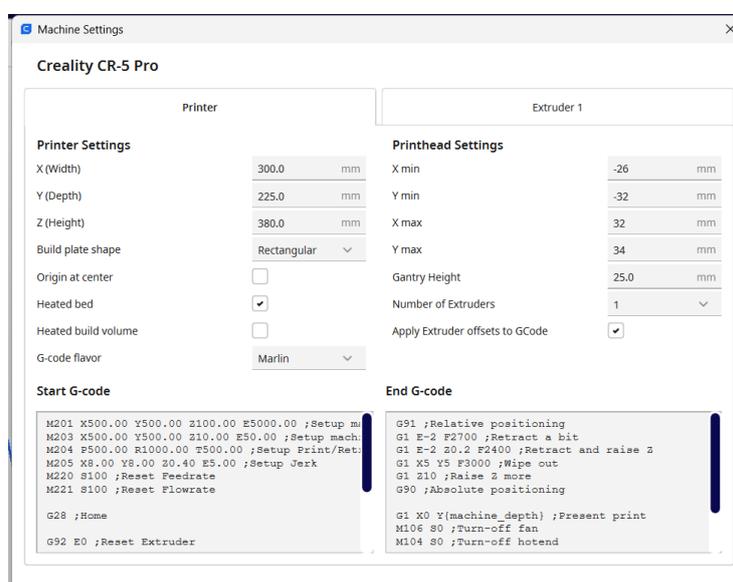


Figura 16. Parámetros que metemos en la impresora

También, hemos diseñado un material personalizado con las características del PLA, que usaremos en nuestra impresión, las características las encontramos en la Figura 17:

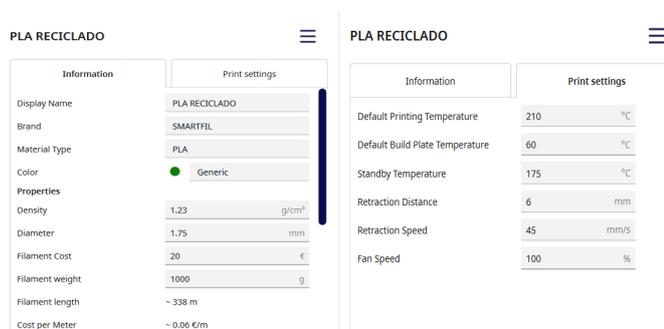
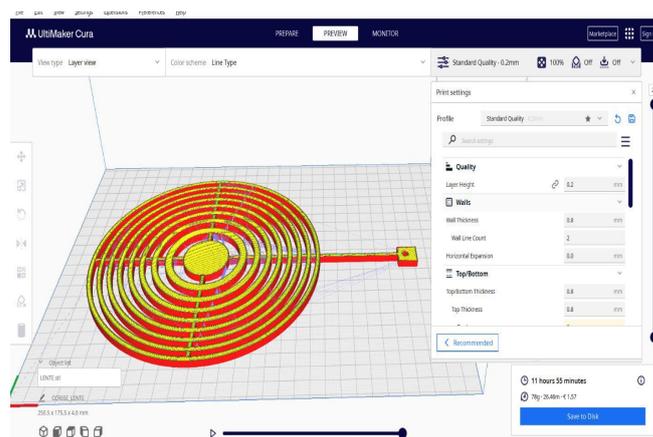


Figura 17. Especificaciones del PLA

Con el material y la impresora ya seleccionados, cargamos el archivo .stl en el software de impresión y ajustamos las configuraciones para la impresión. Se necesita establecer un relleno del 100% para que el objeto sea completamente 100% sólido, buscando la similitud con las simulaciones a ordenador. Además, evitamos el uso de soportes o capas de adherencia antes de la primera capa, para así no evitar el procesamiento posterior que

podría distorsionar el objeto y alterar los resultados. Se elige una altura de capa de 0.2 mm para equilibrar entre calidad de impresión y duración del proceso. Finalmente, se ajustan las temperaturas: 210°C para la boquilla y 60°C para la cama caliente, asegurando así que la pieza se imprima correctamente y sin deformaciones durante el enfriamiento. Con los datos correctamente ajustados, y la pieza ‘sliceada’, obtenemos el resultado final que podemos observar en la Figura 18:



**Figura 18. Pieza final en UltimakerCura**

El tiempo aproximado de impresión de la lente normal es de unas 12 horas a 60mm/s de velocidad máxima, y la lente prima se imprime en unas 9 horas con las mismas características de impresión.

En la impresión se ha utilizado un adhesivo especial, el MAGIGOO, para que la pieza quede adherida a la cama de impresión desde la primera capa.

Después de configurar e iniciar el proceso de impresión, obtuvimos la primera pieza impresa: la lente de Fresnel normal. En la Figura 19 se muestra la estructura de la lente que tiene un diámetro de 18 centímetros:



**Figura 19 Lente Fresnel normal  
impresión 3D**

En la Figura 20 se presenta la lente de Fresnel con la modificación de una máscara de números primos, con un diámetro de 18,5 centímetros. Esta variación introduce patrones específicos en la superficie de la lente, demostrando la capacidad del proceso de impresión 3D para crear diseños personalizados. A pesar de reducir el tiempo de impresión a 9 horas, se mantuvieron las mismas condiciones de temperatura y velocidad, lo que permitió obtener una pieza final sin deformaciones ni imperfecciones.



**Figura 20. Lente fresnel con máscara de números primo impresión 3D**

La lente que simulamos es equivalente a una lente de Soret (SZP), cuyos anillos son completamente rígidos. Los datos utilizados en COMSOL corresponden al latón, que se comporta como una lente rígida en el agua. Sin embargo, dado que no teníamos acceso a una fresadora para fabricar la lente de latón, optamos por construirla mediante impresión 3D utilizando ácido poliláctico (PLA). En el prototipo experimental, se ha utilizado una compensación de fase de incidencia para lograr que los anillos actúen como elementos opacos al sonido.

## 5.2 Montaje Experimental

Para realizar el experimento utilizamos un sistema avanzado de adquisición y control de datos en ambiente de inmersión controlada, desarrollado en la Universitat Politècnica de València. Este sistema, denominado Arquímedes, está instalado en el Laboratorio de Acústica del Departamento de Física Aplicada, perteneciente al Centro de Tecnología Física.

El montaje experimental se realizó en un tanque de agua de dimensiones  $0,5 \times 0,5 \times 1$  m, con una capacidad de aproximadamente 200 L de agua destilada, intentando minimizar las interferencias externas. Estas dimensiones proporcionan el espacio necesario para sumergir completamente los elementos necesarios, lo que garantiza las condiciones ideales para las pruebas acústicas.

El sistema Arquímedes incluye un robot de alta precisión que controla la posición tridimensional de sondas y sensores en el tanque, como se ilustra en la Figura 21. Este

robot incluye tres ejes cartesianos, lo que permite el movimiento en las direcciones X, Y y Z con una precisión de 0,005 mm, lo que garantiza una alineación y un posicionamiento precisos durante las mediciones.

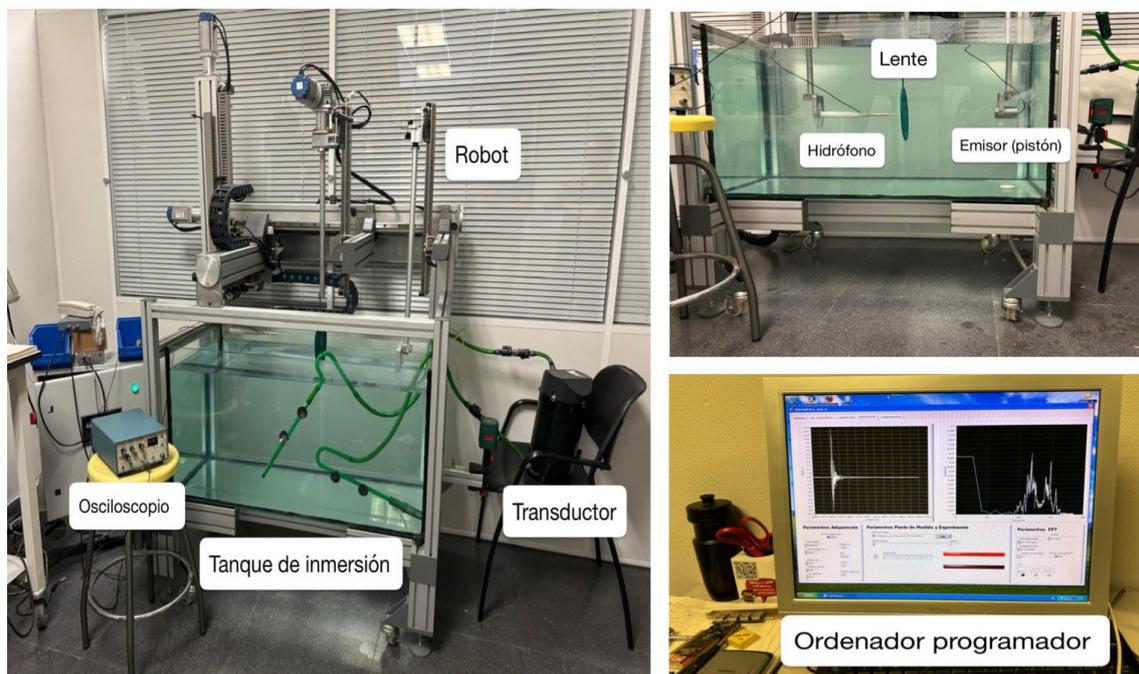
Además, se integra un sistema de rotación en uno de los brazos para ajustar el ángulo de la muestra, ampliando así las capacidades de prueba.

La adquisición de datos se realizó utilizando una tarjeta de control de movimiento NI PCI-7330 y un osciloscopio digital PicoScope 3224 (ver Figura 21). Este último graba, con resolución de 12 bits, las señales de audio generadas en el tanque.

El software 3DReAMSUltra, desarrollado en LabVIEW, gestiona automáticamente tanto los movimientos del robot como la recopilación de datos, facilitando experimentos complejos y repetitivos.

En cuanto a los componentes del sistema de medición, se utilizó como fuente de ultrasonido un transductor de pistón Imasonic de 250 kHz, mientras que la adquisición se realizó mediante un dispositivo hidroeléctrico de aguja de 1,0 mm de Precision Acoustics, ambos representados en la Figura 21. Este hidrófono tiene una alta sensibilidad a las altas frecuencias, lo cual es importante para capturar detalles finos del entorno submarino. La señal generada por el transductor es reforzada por un botón Panametrics 5077PR, lo que garantiza una generación continua y controlada de pulsos de ultrasonido.

Luego, los datos recopilados los procesamos utilizando Matlab®, lo que permite la creación de un análisis detallado del comportamiento de las ondas, lo que facilita la visualización de resultados y poder comparar los resultados experimentales con los teóricos.



**Figura 21 Configuración experimental donde se han realizado las pruebas desde un plano general, desde dentro del tanque y el ordenador programador**

## 6. Resultados

### FWHM y FLHM

Para analizar distribuciones de intensidad en imágenes, hemos calculado FWHM y FLHM.

En nuestro análisis, hemos extraído dos cortes de la imagen para calcular estas medidas. A continuación, presentamos la gráfica de donde obtenemos FWHM, con un valor aproximado de 7 mm Figura 22, y la gráfica donde calculamos FLHM, con un valor aproximado de 23 mm Figura 23.

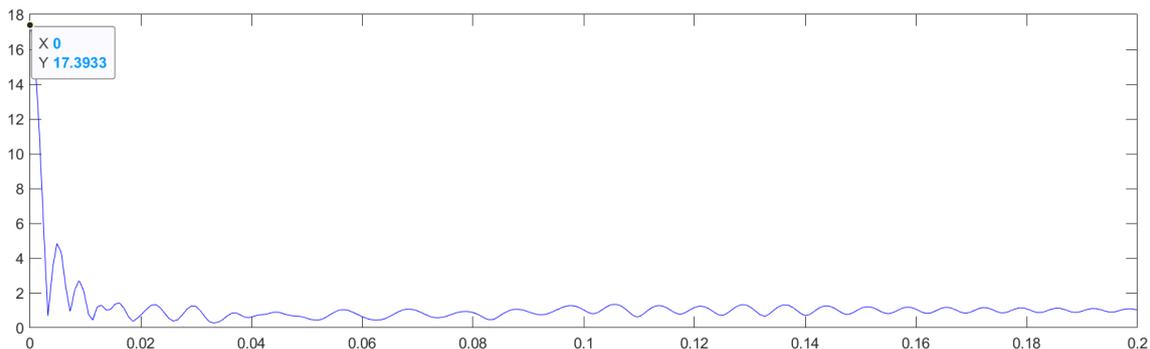


Figura 22. Corte para calcular FWHM

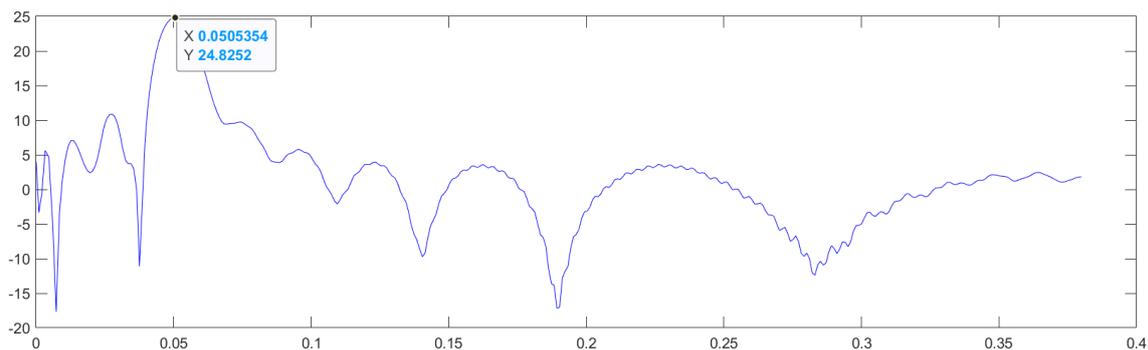


Figura 23. Corte para calcular FLHM

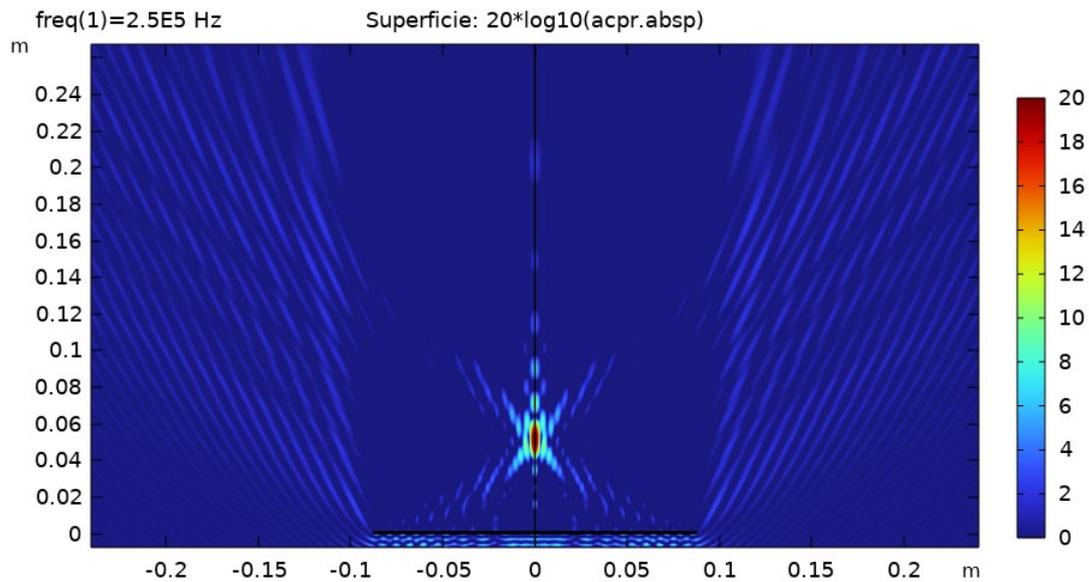


Figura 22. Mapa de Ganancia lente Fresnel

La Figura 24 muestra el plano de presión absoluta normalizada correspondiente a la lente SZP. En ella se puede apreciar un único foco, ubicado en la posición focal diseñada, con su centro en el eje Z a 0.05 m y en el plano horizontal en  $R = 0$  m. Esto confirma que el diseño del estudio, que tenía como objetivo una distancia focal ( $FL$ ) de 5 cm, se logró exitosamente.

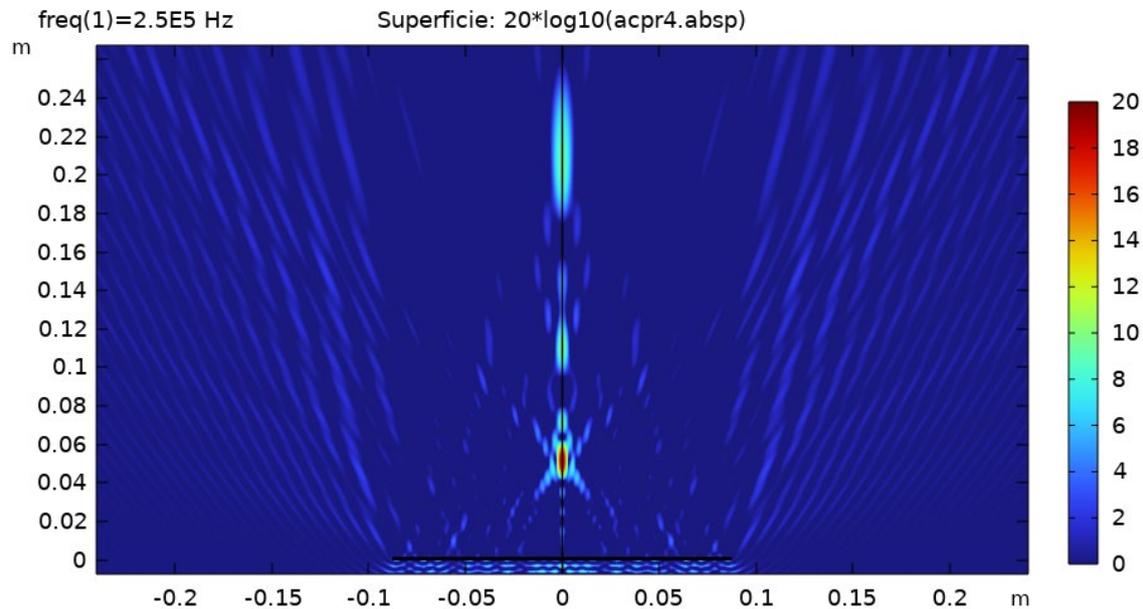


Figura 23. Mapa de ganancias lente de Fresnel con máscara de números primos

En la Figura 25 se muestra el plano de presión absoluta normalizada para la lente Fresnel con máscara de números primos. Se pueden identificar múltiples puntos de focalización, en lugar de un único foco. Estos focos están alineados en la posición central del eje Z a 0.05 m, coincidiendo con el plano horizontal en  $R = 0$  m. Este resultado sugiere una distribución de energía focalizada en varios puntos, lo cual difiere del diseño inicial que buscaba un solo punto de focalización a una distancia focal ( $FL$ ) de 5 cm.

Corte longitudinal de lente original y primos

Para comparar el rendimiento de ambas lentes, se realizaron dos cortes longitudinales. Estos nos permiten observar y analizar la generación del foco en cada caso. Nos proporcionan una visión detallada de cómo la estructura interna de la lente original y la lente modificada con números primos afecta la concentración y distribución de las ondas. Los resultados de esta comparación se muestran en la Figura 23.

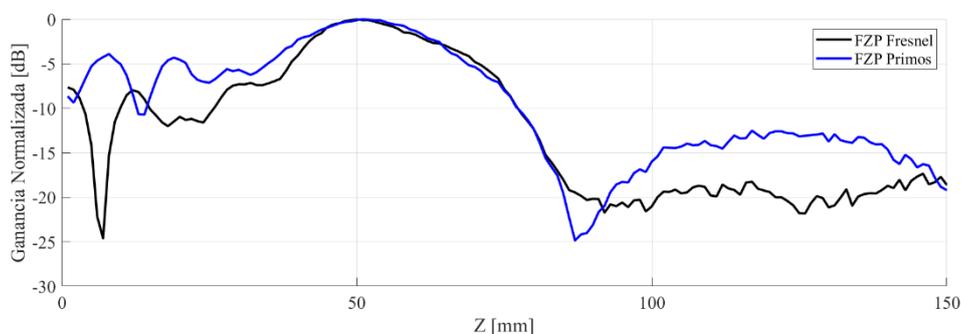


Figura 24. Corte longitudinal de lente original y primos

En la Figura 26 se muestra un corte longitudinal a lo largo del eje Z en  $R = 0$  m, donde se compara la ganancia normalizada en función de la distancia. La línea negra representa la lente Fresnel, mientras que la línea azul corresponde a la lente Fresnel con máscara de números primos.

Observando la curva negra, se aprecia un único pico de ganancia máxima alrededor de los 50 mm, lo cual confirma la presencia de un solo foco en la posición esperada, coincidiendo con la distancia focal diseñada de 5 cm. Esto es consistente con la expectativa de un foco único y bien definido.

Por otro lado, la curva azul muestra dos picos de ganancia significativa: el primero alrededor de los 50 mm y el segundo aproximadamente en torno a los 125 mm. Esto indica que la lente de números primos genera más de un foco en diferentes posiciones a lo largo del eje Z, lo que explica la distribución de energía en múltiples puntos de focalización, como se observó en la Figura 26, el mapa de ganancia de los primos, donde conforme se avanza en el eje Z se pueden apreciar más puntos focales. Esta diferencia sugiere que la lente de números primos introduce una variación en la distribución focal, generando un comportamiento más complejo con más puntos de alta concentración de presión.

#### Corte longitudinal experimental Primos

Los datos que se presentan en la Figura 27 contiene un corte longitudinal de los datos experimentales que hemos realizado con la lente modificada con la máscara de números primos.

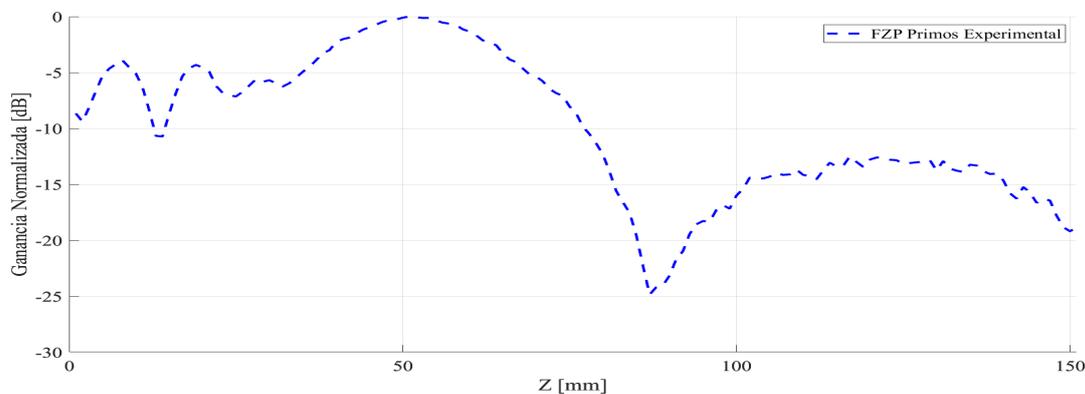


Figura 25. Corte longitudinal experimental Primos

La Figura 27 muestra una gráfica que representa la ganancia normalizada (en decibelios, dB) en función de la distancia  $Z$  (en milímetros, mm) para la medida experimental de la lente de Fresnel con máscara de números primos.

La ganancia normalizada se representa en el eje vertical, con una escala que va desde -30 dB hasta 0 dB. La distancia  $Z$  se representa en el eje horizontal, con una escala que va desde 0 mm hasta 150 mm. Los resultados experimentales se muestran como una línea azul punteada.

La curva presenta un pico pronunciado alrededor de  $Z = 50$  mm, donde la ganancia alcanza su valor máximo, ligeramente por debajo de 0 dB. A partir de este punto, la ganancia disminuye gradualmente hasta aproximadamente  $Z = 80$  mm, donde se encuentra el valor más bajo de la gráfica, después en torno a 125 mm se encuentra un segundo pico menos pronunciado que el primero, lo que nos da a entender que la lente Fresnel con máscara de números primo produce una focalización múltiple.

Corte longitudinal experimental Fresnel

La Figura 25 muestra un corte longitudinal basado en los datos experimentales obtenidos de la lente Fresnel normal

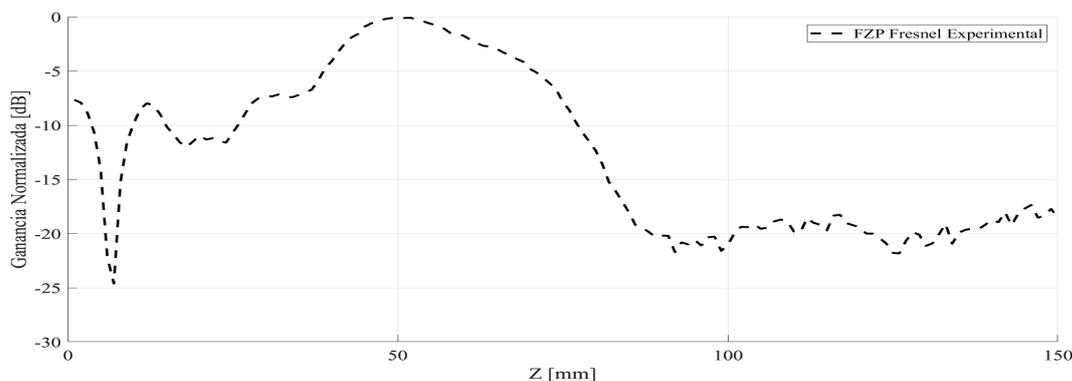


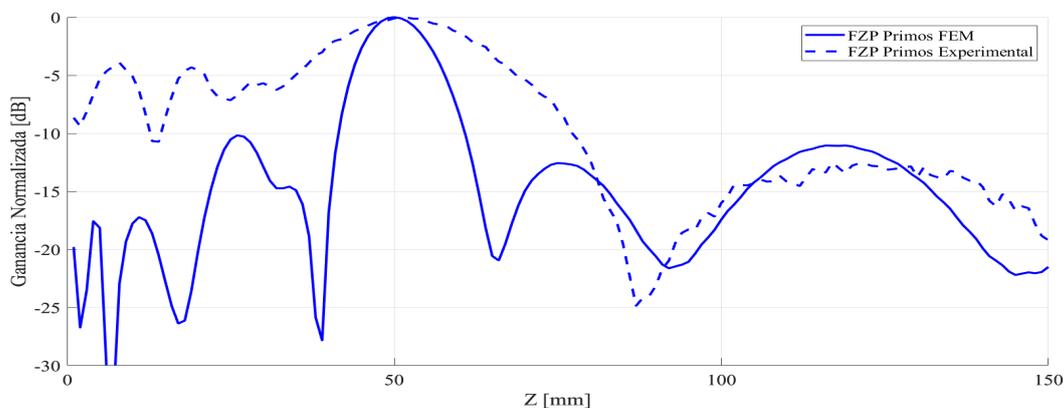
Figura 26. Corte longitudinal experimental Fresnel

La Figura 28 muestra una gráfica que representa la ganancia normalizada (dB) en función de la distancia  $Z$  (mm) para la medida experimental de una lente Fresnel normal.

La curva presenta un pico pronunciado alrededor de  $Z = 50$  mm, donde la ganancia alcanza su valor máximo, cercano a 0 dB. A partir de este punto, la ganancia disminuye gradualmente hasta aproximadamente  $Z = 100$  mm, donde se estabiliza entre -15 dB y -20 dB con pequeñas fluctuaciones. Lo que muestra, calculado numéricamente antes, como la lente Fresnel tiene un único punto de focalización.

### Comparación entre teórica y experimental de primos

Para comparar la precisión del diseño, realizamos un análisis entre los cortes longitudinales teóricos y experimentales de la lente modificada con la máscara de números primos, los representamos en la Figura 26.



**Figura 27. Corte longitudinal que muestra comparación entre teórica y experimental de primos**

La Figura 29 muestra una gráfica que compara la ganancia normalizada para las medidas de simulación de la lente de Fresnel con la máscara de números primos con su medida experimental.

Ambas curvas presentan un pico de ganancia seguido de un descenso gradual, aunque con algunas diferencias, sobre todo los primeros centímetros, donde los valores de ganancia son superiores en la medida experimental en comparación con la simulación. La curva de simulación es más suave y simétrica. La curva experimental muestra más fluctuaciones y una ligera asimetría. La ganancia máxima es similar en ambos casos, cercana a 0 dB, en aproximadamente  $Z=50$  mm. Para  $Z > 100$  mm, ambas curvas presentan un segundo pico menos pronunciado.

Estas diferencias sugieren pequeñas discrepancias entre el modelo teórico y el comportamiento real, posiblemente debido a tolerancias de fabricación o errores de medición. Un análisis más detallado de estas desviaciones podría ayudar a mejorar la precisión del modelo o del proceso de medición. En general ambas curvas representan unos resultados bastante parecidos lo que nos da a entender que el experimento ha sido bien realizado

### Comparación entre teórica y experimental normal

Para evaluar la precisión del diseño, también realizamos un análisis para comparar entre los cortes longitudinales teóricos y experimentales de la lente Fresnel normal, tal como se representa en la Figura 29.

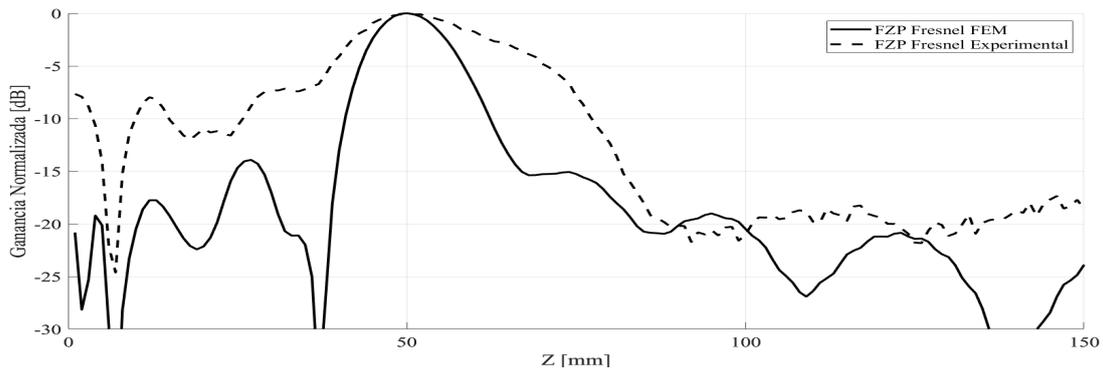


Figura 28. Corte longitudinal comparación entre teórica y experimental normal

La Figura 30 muestra una gráfica que compara la ganancia normalizada para las medidas de simulación de la lente de Fresnel normal con su medida experimental.

Ambas curvas muestran un pico de ganancia seguido de un descenso gradual. La curva de simulación es más suave y simétrica. La curva experimental presenta fluctuaciones e irregularidades. Se puede apreciar, por lo general que las dos curvas siguen el mismo patrón, con su único pico entorno a  $Z=50$  mm, en cambio, las medidas experimentales presentan una ligera mayor ganancia durante todo el eje  $Z$ .

Las discrepancias observadas son debidas a que la lente está construida en PLA y las simulaciones del COMSOL Multiphysics® fueron diseñadas para una lente de latón. Lo que implica que a pesar de que se ha corregido la fase de incidencia, el efecto borde no actúa de la misma forma que en una lente SZP, por tanto, genera una expansión focal.



## 7. Conclusiones

En el trabajo se ha explorado la modulación de haces de ultrasonido mediante la combinación de lentes de Fresnel con máscaras basadas en series numéricas, concretamente números primos. Se ha realizado un estudio tanto numérico como experimental, mostrando la posibilidad de controlar la forma y distribución de los focos ultrasónicos.

Los resultados numérico y experimental han demostrado que, mientras que con una lente de Fresnel convencional se genera un único foco de focalización, la inserción de una máscara basada en primos crea múltiples focos a lo largo del eje de propagación. Aunque los focos secundarios puedan tener menos intensidad que el primario, todavía tienen enorme potencial en aplicaciones médicas, como la terapia de ablación o diagnóstico por ultrasonido, donde la habilidad de enfocarse en múltiples puntos simultáneamente o secuenciales pueda ser útil.

A través del trabajo se ha generado un modelo computacional basado en el método de elementos finitos, capaz de simular adecuadamente los fenómenos físicos que participan en la modulación de haces acústicos. Se ha creado un sistema experimental de precisión para la medida y caracterización de comportamiento de lentes diseñadas, permitiendo validar concordancias y obtener una mejor comprensión de comportamientos observados. Este estudio ha demostrado la conveniencia de utilizar máscaras basadas en números primos para modulación de haces ultrasónicos, proporcionando nuevas posibilidades en lentes acústicas con patrón de focalización personalizado. Los resultados obtenidos forman la base para nuevas líneas de investigación en el campo, explorando series numéricas diferentes y patrones de máscaras para proporcionar mejor flexibilidad y control en la modulación de haces ultrasónicos.

Así mismo, además del desarrollo de la nueva lente ultrasónica, este trabajo ha permitido desarrollar habilidades técnicas y conocimientos en el campo de la simulación numérica y la experimentación con ultrasonidos. En particular, se ha ganado experiencia en el uso de software especializado como COMSOL Multiphysics® y Matlab® y su aplicación del método de elementos finitos para simular fenómenos físicos complejos.

En resumen, este trabajo de final de grado ha alcanzado su objetivo principal de investigar la posibilidad de modular haces de ultrasonido a través de lentes de Fresnel modificadas con máscaras basadas en números primos. Los resultados presentados muestran claramente el potencial de esta técnica para su uso tanto en medicina como en aplicaciones industriales y establecen una sólida base para futuras investigaciones en este campo.

## 8. Relación del trabajo con los objetivos de desarrollo sostenible de la agenda 2030.

Tabla 2. Objetivos de desarrollo sostenible de la agenda 2030

Objetivos de desarrollo sostenibles	Alto	Medio	Bajo	No Procede
ODS 1. Fin de la pobreza				X
ODS 2. Hambre cero				X
ODS 3. Salud y bienestar		X		
ODS 4. Educación de calidad				X
ODS 5. Igualdad de género				X
ODS 6. Agua limpia y saneamiento				X
ODS 7. Energía asequible y no contaminante			X	
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico			X	
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras		X		
ODS 10. Reducción de las desigualdades			X	
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles				X
ODS 12. Producción y consumo responsables				X
ODS 13. Acción por el clima				X
ODS 14. Vida submarina				X
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres				X
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas				X
ODS 17. Alianzas para conseguir objetivos			X	

Al innovar en la creación de nuevas tecnologías, como es mi lente de Fresnel con máscara de números primo, mi trabajo contribuye directamente al ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructuras), promoviendo la industria y el avance tecnológico. Además, al enfocarse en tecnologías limpias y precisas, también contribuyes al ODS 7 (Energía Asequible y No Contaminante), ya que el uso de ultrasonidos puede llevar a un uso más eficiente de la energía en diversas aplicaciones.

El impacto positivo en la salud y bienestar (ODS 3) también es un punto muy relacionado con mi trabajo, ya que los ultrasonidos tienen aplicaciones potenciales en el campo de la medicina. Al mismo tiempo, este proyecto podría contribuir indirectamente a la reducción



de las desigualdades (ODS 10), al hacer que tecnologías avanzadas sean más accesibles y aplicables en diversas áreas industriales y médicas.

## 9. Trabajos Futuros.

### 9.1 Avances Recientes en el Diseño de Lentes de Fresnel

En los últimos años, ha habido importantes avances en el diseño y la fabricación de lentes de Fresnel que han ampliado aún más su aplicabilidad y eficiencia. Una de las áreas más destacadas de innovación ha sido la integración de nuevas tecnologías de materiales y métodos de fabricación avanzados. Por ejemplo, la utilización de materiales compuestos y nanomateriales ha permitido la creación de lentes de Fresnel con propiedades ópticas mejoradas y mayor durabilidad [7].

Otro avance significativo ha sido la optimización del diseño de patrones de difracción mediante algoritmos de aprendizaje automático y técnicas de optimización computacional. Estas tecnologías permiten diseñar lentes que maximizan la eficiencia de enfoque y minimizan las aberraciones ópticas, adaptándose a las necesidades específicas de diferentes aplicaciones. Esto es particularmente útil en el desarrollo de lentes para dispositivos de realidad virtual y aumentada, donde la calidad de la imagen es crítica [7]. Además, como hemos visto en este trabajo, el uso de la impresión 3D ha abierto nuevas posibilidades en el diseño de lentes de Fresnel. La impresión 3D permite la creación de geometrías complejas con alta precisión, lo que facilita la personalización de lentes para aplicaciones específicas y la producción de prototipos de manera rápida y económica.

### 9.2 Potenciales Futuras Aplicaciones

Las lentes de Fresnel continúan evolucionando y encontrando nuevas aplicaciones en diversos campos. En el ámbito de la energía solar, se están desarrollando nuevos sistemas de concentración solar que utilizan lentes de Fresnel para mejorar la eficiencia de los paneles solares y reducir los costos de producción de energía. Estos sistemas tienen el potencial de hacer la energía solar más accesible y rentable a gran escala [21].

Otra aplicación emergente es en la fabricación de instrumentos médicos compactos y precisos para la detección y tratamiento de enfermedades. Por ejemplo, en dispositivos de imagen médica donde se requiere una manipulación precisa de la luz para capturar imágenes detalladas, las lentes de Fresnel podrían ser clave para reducir el tamaño y mejorar la eficiencia de estos equipos. También se están investigando sus aplicaciones en sistemas de diagnóstico portátil, lo cual sería revolucionario para áreas de salud con recursos limitados.

Estas innovaciones apuntan a un futuro donde las lentes de Fresnel podrían facilitar el desarrollo de tecnología médica más accesible y eficiente, lo cual es esencial para mejorar la atención médica [22].





- [14] A. J. Lawrence, Benjamin M. Goldsberry, Samuel P. Wallen, Michael R. Haberman; Numerical study of acoustic focusing using a bianisotropic acoustic lens. *J. Acoust. Soc. Am.* 1 October 2020; 148 (4): EL365–EL369. <https://doi.org/10.1121/10.0002137>
- [15] M. H. Weissman, «Smithsonianmag,» 2 4 2018. [En línea]. Available: <https://www.smithsonianmag.com/science-nature/why-prime-numbers-still-fascinate-mathematicians-180968652/>. [Último acceso: 21 6 2024].
- [16] «FasterCapital,» [En línea]. Available: <https://fastercapital.com/es/tema/aplicaciones-de-n%C3%BAmeros-primos-y-compuestos-en-la-vida-real.html>. [Último acceso: 1 7 2024].
- [17] G. Mirlisenna, «Esss,» [En línea]. Available: <https://www.esss.com/es/blog/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/>. [Último acceso: 1 7 2024].
- [18] «Proyecta estudio,» [En línea]. Available: <https://proyectaestudio.es/programas-de-analisis-de-elementos-finitos-top-5/>. [Último acceso: 5 7 2024].
- [19] Fuyin Ma, Zhen Huang, Chongrui Liu, Jiu Hui Wu; Acoustic focusing and imaging via phononic crystal and acoustic metamaterials. *J. Appl. Phys.* 7 January 2022; 131 (1): 011103. <https://doi.org/10.1063/5.0074503>
- [20] «Dayyphotonics,» [En línea]. Available: <https://dayyphotonics.com/knowledgebase/full-width-at-half-maximum-fwhm-explained>. [Último acceso: 17 7 2024].
- [21] O. Ormachea Muñoz y D. Serna Revollo, «Optimización de la eficiencia de sistemas fotovoltaicos a través de recolección solar, basada en lentes de Fresnel», *I&D*, vol. 1, n.º 9, ene. 2010.
- [22] «eeworldonline,» 15 4 2020. [En línea]. Available: <https://www.eeworldonline.com/the-fresnel-lens-an-obsolete-innovation-finds-a-21st-century-role-part-4/>. [Último acceso: 25 6 2024].
- [23] Wang, Q. (2018). Carreras de huracán. Proyecto de control interactivo de exploración vr de unity y arduino. <http://hdl.handle.net/10251/113868>