



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

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

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de
Telecomunicación

Modulación de haces de ultrasonidos mediante la
modificación de lentes de Fresnel

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de
Telecomunicación

AUTOR/A: Sujar Cost, Rafael

Tutor/a: Castiñeira Ibáñez, Sergio

Cotutor/a: Tarrazó Serrano, Daniel

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

MODULACIÓN DE HACES DE ULTRASONIDOS MEDIANTE LA MODIFICACIÓN DE LENTES DE FRESNEL.

Alumno: Rafael Sujar Cost

Tutores: Sergio Castiñeira Ibáñez y
Daniel Tarrazó-Serrano



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

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

Agradecimientos:

«Quisiera, en esta instancia, agradecer a muchas personas que me han prestado su ayuda en la recta final hacia mi titulación.

En primer lugar, a mis tutores, por todo lo que me ha enseñado e incentivado durante este proceso y por aguantarme/soportarme. No ha sido fácil, para nada, pero ha valido la pena el esfuerzo. Gracias por haberme ayudado cuando creía que no podía. Gracias Dani y Sergio.

A Juan Carlos, María, Fernando, Antonio, Marina... sin vosotros hubiera costado el doble.

A David, el cual a veces mataría, pero sin él no sería nada igual.

A David, Pablo, Javi y Carlos por siempre estar a mi lado.

A Celia, por alegrarme los días más oscuros.

Y a mis abuelos y hermano principalmente, los cuales quiero agradecerles todo, por dármele todo más fácil, os quiero.

Esto va para todos ustedes.»



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

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

Resumen

El presente trabajo pretende analizar y caracterizar numérica y experimentalmente la capacidad de modular haces de ultrasonidos mediante la modificación de lentes de Fresnel. En primer lugar, se describirán las herramientas numéricas basadas en elementos finitos utilizadas y cómo generar un modelo numérico que sea capaz de replicar los fenómenos físicos implicados en la modulación de un haz de ultrasonidos. En segundo lugar, se describirá el montaje experimental que permite validar los modelos y dar validez a los modelos numéricos. Por último, se propondrá una modificación de una lente de Fresnel que permita modificar parámetros característicos del foco tales como por ejemplo el FWHM, FLHM y la Ganancia Focal.

Resum

El present treball pretén analitzar i caracteritzar numèricament i experimentalment la capacitat de modular feixos d'ultrasons mitjançant la modificació de lents de Fresnel. En primer lloc es descriuran les eines numèriques basades en elements finits utilitzades i com generar un model numèric que siga capaç de replicar els fenòmens físics involucrats en la modulació d'un feix d'ultrasons. En segon lloc, es descriurà el muntatge experimental que permet validar els models i donar validesa als models numèrics. Finalment, es proposarà una modificació d'una lent de Fresnel que permeta modificar paràmetres característics del focus com ara per exemple el FWHM, FLHM i la Ganància Focal.

Abstract

This work aims to analyze and characterize numerically and experimentally the ability to modulate ultrasound beams by modifying Fresnel lenses. Firstly, the finite element-based numerical tools used and how to generate a numerical model that is able to replicate the physical phenomena involved in the modulation of an ultrasound beam will be described. Secondly, the experimental setup will be described to validate the models and give validity to the numerical models. Finally, a modification of a Fresnel lens will be proposed in order to modify characteristic focus parameters such as FWHM, FLHM, and Focal Gain.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

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



Índice

Capítulo 1.	Introducción	1
Capítulo 2.	Objetivos	3
2.1	Objetivo general	3
2.2	Objetivos específicos.....	3
2.3	Relación del trabajo con los ODS	3
2.4	Relación del TFG con el grado y la profesión.....	4
Capítulo 3.	Metodología	6
3.1	Lentes acústicas: Lente de Fresnel	6
3.2	Construcción de lentes de Fresnel	6
3.3	Principios físicos	6
3.3.1	Difracción.....	6
3.3.2	Óptica geométrica	7
3.4	Ecuaciones y esquemas	9
Capítulo 4.	Modelo numérico	10
4.1	Introducción de COMSOL Multiphysics®	10
4.2	Creación del modelo numérico mediante COMSOL Multiphysics®	10
4.2.1	Construcción del modelo.....	11
Capítulo 5.	Montaje experimental.....	18
5.1	Sistema de medición y sus partes	18
Capítulo 6.	Resultados	20
6.1	Resultados numéricos.....	20
6.1.1	Resultados numéricos para SZP en COMSOL Multiphysics®.....	20
6.1.2	Resultados numéricos para PSZP en COMSOL Multiphysics®.....	21
6.2	Resultados experimentales	22
6.2.1	Resultados experimentales para la SZP.....	22
6.2.2	Resultados experimentales para PSZP	23
6.3	Comparación de resultados	24
6.3.1	SZP.....	24
6.3.2	PSZP.....	25
Capítulo 7.	Conclusiones	27
7.1	Limitaciones y problemas	27
7.2	Líneas futuras	28



Bibliografía: 30



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

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



Índice de Figuras

Figura 1. Longitud del foco en un eje	2
Figura 2. ODS número 3 de Salud y Bienestar	4
Figura 3. Variedad de físicas a usar en COMSOL Multiphysics®	4
Figura 4. Lentes analizadas: (a) SZP, (b) PSZP	7
Figura 5. Trazado de rayos para SZP	8
Figura 6. Trazado de rayos para SZP (a) y PSZP (b)	9
Figura 7. Elección de dimensión de espacio en COMSOL Multiphysics®	10
Figura 8. Elección de la física usada	11
Figura 9. Diferentes apartados de construcción de COMSOL Multiphysics®	11
Figura 10. Tabla de parámetros definidos en COMSOL Multiphysics® mediante fórmulas o parámetros	12
Figura 11. Creación de rectángulo en COMSOL Multiphysics®	12
Figura 12. Creación de los radios de la lente en COMSOL Multiphysics®	13
Figura 13. Creación de un punto en COMSOL Multiphysics®	13
Figura 14. Creación del agua como material en COMSOL Multiphysics®	14
Figura 15. Implantación de los contornos rígidos al sonido en COMSOL Multiphysics®	14
Figura 16. Implantación del campo de presión de fondo en COMSOL Multiphysics®	15
Figura 17. Construcción del mallado en COMSOL Multiphysics®	16
Figura 18. Cálculo de un estudio en COMSOL Multiphysics®	16
Figura 19. Esquema de la simulación numérica donde se indican las condiciones de contorno y los materiales	17
Figura 20. Configuración experimental donde se han realizado las pruebas desde un plano general (a) y desde dentro del tanque (b), donde se puede observar el hidrófono, la lente y el pistón. En (c) se muestra el hidrófono de aguja y en (d) la lente de Fresnel	18
Figura 21. Solución mapa de presión absoluto para SZP en COMSOL Multiphysics®	20
Figura 22. Gráfica de corte longitudinal de la presión partida de su máximo en función de la distancia para SZP	20
Figura 23. Solución mapa de presión absoluta para PSZP en COMSOL Multiphysics®	21
Figura 24. Gráfica de corte longitudinal de la presión partida de su máximo en función de la distancia para PSZP	21
Figura 25. Solución experimental del mapa de presión absoluta para la SZP	22
Figura 26. Gráfica experimental de corte longitudinal de la presión partida de su máximo en función de la distancia para SZP	23
Figura 27. Solución experimental del mapa de presión absoluta para PSZP	23
Figura 28. Gráfica experimental de corte longitudinal de la presión partida de su máximo en función de la distancia para PFZP	24



Figura 29. Comparativa entre resultados numéricos y experimentales de lente SZP.....	24
Figura 30. Comparativa de desplazar a 5 cm ambos máximos	25
Figura 31. Comparativa entre resultados numéricos y experimentales de lente PFZP	26
Figura 32. Comparativa de desplazar a 5 cm ambos máximos	26

Capítulo 1. Introducción

La necesidad de manipular las ondas ha sido uno de los principales objetivos de la comunidad científica. Las lentes son dispositivos que consiguen, a través de diferentes fenómenos físicos como la refracción, que es el cambio de dirección y velocidad que experimenta el haz, o la difracción, que es la propiedad que tienen los haces de rodear obstáculos en determinadas condiciones, efectos de focalización, con el objetivo de generar más focos, y modulación de haces, se basa en la localización y variación de parámetros de la onda portadora en función de las alteraciones de la onda moduladora. [1]

Los ultrasonidos son ondas sonoras de alta frecuencia que están por encima del rango de audición humana, es decir, tienen frecuencias superiores a 20 kHz. Estas ondas se propagan a través de materiales como el aire, el agua y los tejidos biológicos [2].

Las lentes son unos dispositivos capaces de realizar esta modulación de energía. Controlan la propagación e inciden la energía incidente sobre ellas, debido a que permiten la formación de haces. Estos efectos son producidos por fenómenos como la refracción y la difracción. Uno de los aspectos más importantes es la eficiencia de transmisión, particularmente cuando se presenta un contraste de baja impedancia entre la lente y el medio anfitrión. Debido a la gran variabilidad de las lentes, se han utilizado en diferentes áreas. Por ejemplo, se han aplicado en industria farmacéutica, construcción y sonoquímica [1].

Una de las razones por las que se utilizan en diferentes campos es la reducción de costes, ya que su uso evita la fabricación de nuevos transductores. Debido al interés que han suscitado, su diseño y mejora es actualmente objeto de investigación.

Las lentes se pueden clasificar en varios tipos, algunos de ellos son las acústicas, las planas y las que tienen distinta geometría. Las acústicas son dispositivos que, de forma análoga a cómo hace con la luz una lente de cristal, como una lupa o unas gafas, enfocan y dirigen el sonido para obtener una imagen gracias a las frecuencias sonoras. Se obtienen así imágenes que pueden compararse a las ecografías tradicionales, pero con mejor calidad y en tres dimensiones [3]. Las planas son ampliamente utilizadas en telescopios, microscopios, colimadores, transeptores ópticos, sistemas de condensadores y oculares, donde se necesita colimación de luz o enfoque. La principal ventaja de este tipo de lentes es que un único transductor puede acoplar diferentes tipos que cambien el haz.

La lente de Fresnel es un tipo especial de lente que se basa en el principio de la difracción para enfocar o dispersar la luz u otras formas de radiación electromagnética, como ondas de radio y microondas. La principal característica que distingue a las de Fresnel de las convencionales es su estructura física, las lentes de Fresnel están compuestas por múltiples segmentos angulares, como las piezas de un rompecabezas, que se colocan adyacentes entre sí [4]. Las lentes de Fresnel pueden ser implementadas en acústica y se basa en el principio de la difracción.

Cabría añadir que, mediante Fresnel, las lentes trabajan como una pupila. La función de la pupila, mediante la modificación del tamaño de ella misma, es regular la entrada de luz en el ojo, permitiendo que la retina reciba la luz que necesita. Las lentes, mediante la modificación de sus parámetros, buscan controlar el paso de los haces.

Existen diferentes parámetros que nos permiten caracterizar las propiedades acústicas de las lentes. Entre ellos están el FWHM y el FLHM.

El FWHM (Full Width at Half Maximum) es una medida de la extensión de una función, que viene dada por la diferencia entre los dos valores extremos de la variable independiente en los que la variable dependiente es igual a la mitad de su valor máximo.

El FLHM (Full Length at Half Maximum) corresponde a la "longitud" del foco en la dirección axial, y se calcula a partir de la diferencia entre las posiciones z , en lados opuestos del punto central del foco, en las que la intensidad normalizada es la mitad de su valor máximo.

Análogamente la FWHM representa la anchura del foco a lo largo de la dirección lateral. Tanto el FLHM como el FWHM están relacionados con las resoluciones longitudinal y lateral, ambos se podrían explicar con la Figura 1, dependiendo del plano en el cual estamos trabajando [5].

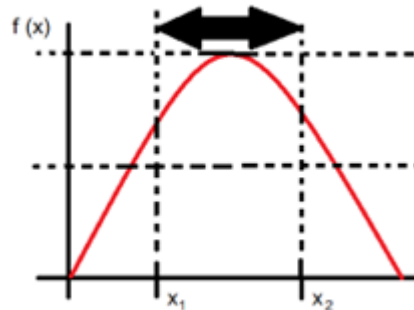


Figura 1. Longitud del foco en un eje

Capítulo 2. Objetivos

2.1 Objetivo general

El presente trabajo pretende analizar y caracterizar numérica y experimentalmente la capacidad de modular haces de ultrasonidos mediante la modificación de lentes de Fresnel.

2.2 Objetivos específicos

OE1: Aprender a utilizar un sistema experimental de medidas para caracterizar dispositivos acústicos en entorno controlado sumergido.

OE2: Modelizar el comportamiento de los dispositivos mediante el método de los elementos finitos.

OE3: Aprender y desarrollar la aplicación de COMSOL Multiphysics®, tanto sus apartados como sus herramientas.

2.3 Relación del trabajo con los ODS

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), también conocidos como Objetivos Globales, son un conjunto de metas globales adoptados por las Naciones Unidas en 2015 como un llamamiento universal para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que para el 2030 todas las personas disfruten de paz y prosperidad.

Existen 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible en total, cada uno de los cuales tiene metas específicas asociadas. Estos objetivos se establecen con el propósito de abordar una serie de desafíos globales y mejorar la calidad de vida de las personas en todo el mundo, al tiempo que se protege el planeta. Los ODS abarcan una amplia gama de temas interrelacionados, como la erradicación de la pobreza, la igualdad de género, la salud, la educación, la acción climática, la paz y la justicia, entre otros [6].

Como se muestra en la Figura 2, este Trabajo Final de Grado aborda el ODS 3, el cual trata sobre la salud y el bienestar. Nos engloban muchas enfermedades o problemas de salud los cuales conviven con nosotros en el día a día. Ya sean el tabaquismo, la contaminación del aire o bien un cáncer.

La tecnología de modulación de haces mediante lentes de Fresnel está surgiendo como una herramienta crucial en la mejora de la atención médica ayudando a enfrentarse a todas estas amenazas. En referencia a la detección de tumores o enfermedades, existen la HIFU (High-Intensity Focused Ultrasonography) que es una técnica médica que consiste en focalizar mediante lentes la energía de un haz de ultrasonido de alta frecuencia en una zona específica, sin introducir ningún tipo de dispositivo o aguja en el paciente. El tratamiento es mínimamente invasivo en el que se utiliza la ablación térmica, es decir calor intenso localizado, para destruir el tejido anormal o tumoraciones. Se aplican temperaturas entre 55°C y 80°C durante unos segundos en puntos focalizados para causar la muerte celular.

El tratamiento de la ablación de tumores se puede realizar mediante varias formas como la quimioterapia, que es el uso de medicamentos contra el cáncer que se inyectan en una vena o que se administran por vía oral. Pero esta solución tiene demasiados efectos secundarios como bien son el cansancio excesivo, la caída del cabello, la tendencia a presentar fácilmente moretones y sangrados, anemia, numerosas infecciones, etc.

La ventaja más relevante de la cirugía no invasiva es que permite eliminar gran parte o toda la lesión tumoral sin ninguna punción, corte, cicatriz ni agresión a tejidos no afectados. Esto permite evitar el ingreso hospitalario con una rápida recuperación del paciente. El uso de esta tecnología está contraindicado para mujeres embarazadas y personas que lleven implantes, estéticos o médicos, o implantes metálicos en la zona a tratar o en su cercanía [7].



Figura 2. ODS número 3 de Salud y Bienestar

2.4 Relación del TFG con el grado y la profesión

La relación del TFG con el grado y la salida de profesión de ingeniero de telecomunicaciones es notable. Los ingenieros de telecomunicaciones desempeñan un papel fundamental en el diseño y desarrollo de sistemas de comunicación óptica, como redes de fibra óptica. La modulación de haces con lentes de Fresnel puede ser una técnica utilizada para controlar y dirigir señales ópticas, lo que es esencial para la transmisión de datos de alta velocidad y la expansión de la infraestructura de telecomunicaciones. Además, están involucrados en la investigación y desarrollo de tecnologías avanzadas para la transmisión de datos, en donde la modulación de haces de ultrasonido mediante la modificación de lentes de Fresnel es una técnica de modulación óptica digna de ser objeto de estudio y mejora constante. En la Figura 3 se muestra la variedad de físicas con la que plataforma de software de análisis y resolución para aplicaciones físicas COMSOL Multiphysics® puede usar, ayudando al ingeniero a abarcar el complejo trabajo de simulación de un laboratorio en una aplicación.

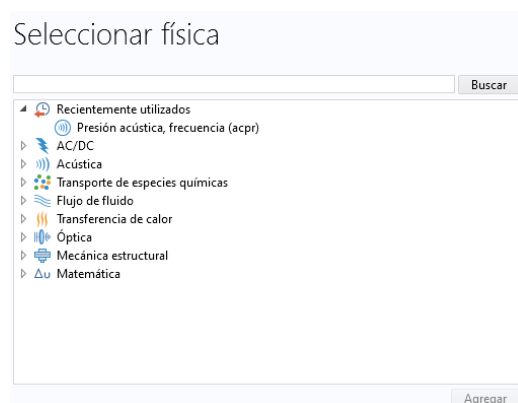


Figura 3. Variedad de físicas a usar en COMSOL Multiphysics®



Para la realización del estudio de la modulación de haces de ultrasonidos mediante lentes de Fresnel ha sido muy importante un buen desarrollo académico y uso de aplicaciones aprendidas durante la carrera. Se han debido conocer aspectos, conceptos y fórmulas matemáticas dadas en asignaturas como Matemáticas I, Matemáticas II y Matemáticas III. Se ha estudiado el comportamiento de una onda plana y diversos aspectos físicos estudiados en Física I y Física II. Se ha trabajado con una plataforma de programación y cálculo numérico como es Matlab®, tratada y usada en muchas asignaturas de la carrera como: Programación, Acústica Ambiental, Sistemas y Señales, Tratamiento Digital de Señales, Tratamiento Digital de Imágenes y Vídeo y otras. Por último, se ha trabajado con un sistema de medición específico y complejo el cual se encuentra en el laboratorio de Física de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación.

Capítulo 3. Metodología

3.1 Lentes acústicas: Lente de Fresnel

Una lente Fresnel es una lente compacta desarrollada originalmente por el físico francés Augustin-Jean Fresnel, el cual la creó principalmente para faros. Aunque la lente de Fresnel original fue desarrollada para aplicaciones ópticas, como cámaras y proyectores, también se ha adaptado para su uso en el campo de los ultrasonidos [4]. En lugar de utilizar la refracción de la luz, como en una lente óptica, una lente de Fresnel ultrasónica aprovecha la difracción de las ondas ultrasónicas para lograrlo. Está compuesta por una serie de anillos o zonas concéntricas, cada una con una distancia específica desde el centro. Cuando las ondas ultrasónicas inciden sobre la lente de Fresnel, experimentan cambios en su dirección y fase debido a las diferencias en las distancias recorridas desde la fuente hasta cada una de sus zonas [8].

La principal característica distintiva de una lente de Fresnel es su perfil plano y delgado. En lugar de tener una forma abultada y voluminosa, como una convencional, las de Fresnel son planas y están hechas de materiales transparentes, como plástico o vidrio, pero en nuestro caso se tratará de metal. Esto les permite ser más livianas y económicas de fabricar.

Las principales utilidades que tiene una lente de Fresnel en el campo de los ultrasonidos son:

- En ecografías y diagnósticos médicos, las lentes de Fresnel enfocan las mejoras de ondas ultrasónicas, mejorando la calidad de las imágenes y logrando una visualización más detallada de los tejidos internos.
- Detección precisa de objetos: En sistemas de detección y rastreo, las lentes de Fresnel concentran ultrasonidos para localizar con precisión objetos en entornos como la navegación autónoma.
- Manipulación Microscópica y Terapia mediante HIFU: En aplicaciones microscópicas, las lentes de Fresnel ayudan a manipular partículas y células mediante ultrasonidos enfocados. También se utilizan en terapias médicas dirigidas, como la fragmentación de cálculos renales.

3.2 Construcción de lentes de Fresnel

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 [9].

3.3 Principios físicos

3.3.1 Difracción

La difracción es el fenómeno mediante el cual la luz se desvía al pasar por un obstáculo o una abertura. En el caso de las lentes de Fresnel, la estructura en forma de escalones actúa como una serie de pequeñas aberturas que difractan la luz. La difracción ayuda a enfocar o dispersar la luz según el diseño de la lente.

Los ultrasonidos son ondas sonoras de alta frecuencia y no visibles al ojo humano. En este contexto, la difracción se refiere al fenómeno en el cual las ondas ultrasónicas cambian de dirección y se propagan alrededor de obstáculos a través de aberturas en ciertas estructuras. Esto sucede cuando las ondas ultrasónicas encuentran un obstáculo que es comparable en tamaño a su longitud de onda. Este fenómeno puede tener efectos significativos en la propagación de las ondas y en su capacidad para penetrar y detectar objetos en un medio. La difracción ultrasónica es un fenómeno importante en aplicaciones como la inspección no destructiva (NDT, por sus siglas en inglés), la medicina (ultrasonografía), la detección de defectos en materiales o las imágenes médicas por ultrasonidos [1].

3.3.2 Óptica geométrica

Las lentes de Fresnel son dispositivos ópticos que utilizan la difracción de la luz para enfocar o dispersarla. A diferencia de las lentes convencionales, las lentes de Fresnel son más delgadas y tienen una serie de anillos concéntricos o secciones que se asemejan a los escalones de una escalera. Se muestra en la Figura 4a, las lentes planas de tipología Soret (SZP) opacas y transparentes alternas o anillos de lentes de Fresnel (FZP). La lente SZP binaria se compone de un anillo concéntrico que actúa como una rejilla casi periódica con diferentes separaciones locales en diferentes distancias. Cuando se utiliza para enfoque puntual, desvía la luz incidente hacia un punto focal específico determinado por estas separaciones. Esto se logra mediante cambios en los ángulos de difracción que aseguran la formación del punto focal. En el caso de la SZP con máscara de pupila (PSZP), como la que se muestra en la Figura 4b, la parte central bloqueada de la SZP se asemeja a rejillas anulares, ya que las zonas transparentes tienen anchos casi constantes. Esto causa que las rejillas locales dirijan la luz hacia diferentes puntos en el eje óptico con un pequeño rango de ángulos de difracción [10].

La lente SZP binaria, como se muestra en la Figura 4a, consta de un anillo concéntrico, que puede tratarse como una rejilla cuasi periódica con diferentes constantes de rejilla locales en diferentes radios. En el caso de la SZP con máscara de pupila (PSZP), como se muestra en la Figura 4b, también se puede considerar como rejillas anulares debido a que los anchos de las zonas transparentes son casi constantes mientras la pupila bloquea una parte central de SZP.

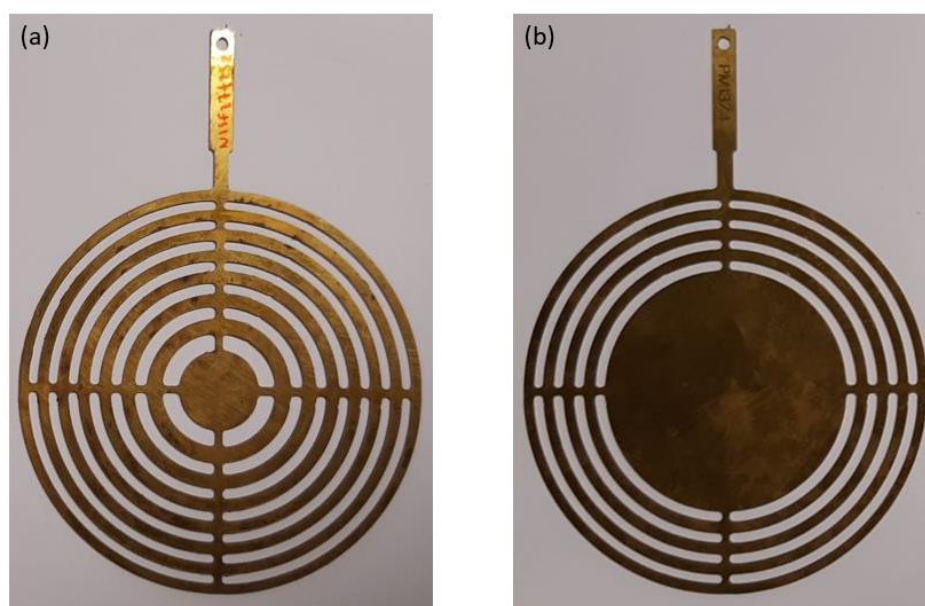


Figura 4. Lentes analizadas: (a) SZP, (b) PSZP

Un axicón es un tipo de lente que a diferencia de las normales permite enfocar la luz en un volumen en vez de en un punto [11]. En el contexto del axicón, la relación entre el ángulo de difracción (θ) y el periodo de rejilla (P) está definida por la ley de Bragg:

$$P \times \sin(\theta) = m \lambda \quad (1)$$

Donde:

- m es el orden de difracción
- λ la longitud de onda incidente

Esto produce un patrón de haz de Bessel como muestra la Figura 5. En el caso de la SZP con máscara de pupila, donde los periodos locales P_i no son regulares, se bloquean los anillos no periódicos. Esto lleva a que los periodos locales se relacionan con los anchos de las zonas transparentes (Δr_i), lo que a su vez produce ángulos de difracción casi constantes (θ_i), y como resultado, la SZP con pupila enmascarada también genera patrones de haz parecidos un Bessel [10].

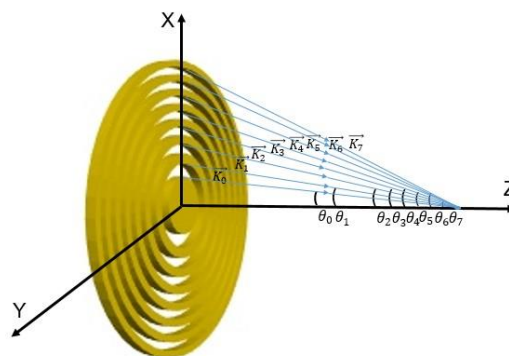


Figura 5. Trazado de rayos para SZP

Al seleccionar el tamaño de la máscara de la pupila, se debe encontrar un equilibrio. Por un lado, las separaciones y el tamaño de las zonas deben aproximarse a un patrón periódico. Por otro lado, se deben dejar tantas zonas como sea posible dentro del diámetro de la lente para lograr un enfoque adecuado. La Figura 6a representa el trazado de rayos para lentes SZP para el enfoque puntual. Estas rejillas locales difractan la onda incidente normal hacia el punto focal diseñado. Los ángulos de difracción cambian para garantizar la formación de un punto focal. En cuanto a la Figura 6b, representa el trazado de rayos para lentes PSZP donde las rejillas locales difractan las ondas incidentes hacia diferentes puntos del eje óptico con un pequeño rango de ángulo de difracción.

Se ha optado por un criterio en el que las diferencias entre los anchos de las zonas adyacentes sean menores que una quinta parte de la longitud de onda ($\lambda/5$) [10].

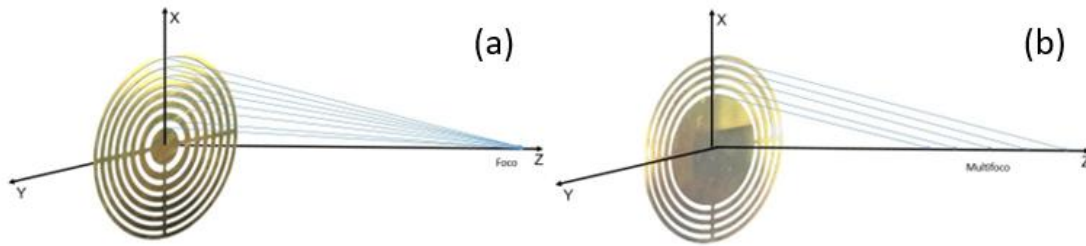


Figura 6. Trazado de rayos para SZP (a) y PSZP (b)

3.4 Ecuaciones y esquemas

Las placas de la zona de Fresnel son estructuras circulares concéntricas, que se conocen como regiones de Fresnel. Cada región consecutiva tiene un π cambio de fase entre ellos. Este hecho contribuye coherentemente a la obtención de altos niveles de intensidad en la distancia focal (F_L), que es la ubicación en la coordenada axial donde se situará el foco. El número de regiones de Fresnel se define como N, esto incluye secciones acústicas tanto opacas como transparentes. La frecuencia de trabajo se define como f_0 y las distancias radiales (r_n) de cada zona de Fresnel se puede obtener utilizando la Ecuación (2), válida para incidencia de onda plana [1].

$$r_n = \sqrt{n \lambda F_L + \left(\frac{n \lambda}{2}\right)^2} \quad (2)$$

donde:

- λ es la longitud de onda, $\lambda = \frac{c_{agua}}{f_0}$, siendo c_{agua} la velocidad del sonido en el agua.
- F_L es la distancia focal.

Si se considera la incidencia de ondas esféricas, la ecuación que se utilizaría sería la Ecuación (3).

$$d + F_L + \frac{n \lambda}{2} = \sqrt{d^2 + r_n^2} + \sqrt{F_L^2 + r_n^2} \quad (3)$$

En este trabajo el diseño se ha utilizado la Ecuación (2) considerando la incidencia de onda plana. Más adelante en el apartado de resultados se comenta por qué se ha usado la Ecuación (2) en lugar de la Ecuación (3).

Capítulo 4. Modelo numérico

4.1 Introducción de COMSOL Multiphysics®

COMSOL Multiphysics® es una destacada aplicación de software de simulación y modelado que se utiliza en diversas disciplinas de la Física e Ingeniería. Permite a los usuarios crear modelos y realizar simulaciones de fenómenos físicos complejos, proporcionando una herramienta poderosa para el diseño, la optimización y el análisis de sistemas. Hoy en día, es ampliamente utilizado en todo el mundo en una variedad de industrias y campos de investigación. Su versatilidad y capacidad para abordar problemas multifísicos lo han convertido en una herramienta esencial para ingenieros, científicos e investigadores que buscan comprender y resolver problemas complejos en campos como la electrónica, la mecánica, la energía, la biotecnología y muchos otros [12]. En el presente trabajo se ha utilizado la versión 6.1 del software, existen diferencias entre versiones anteriores, pero conceptualmente, se podrían utilizar otras versiones para replicar los resultados obtenidos. Al final del Capítulo 4 se muestra un resumen de las condiciones de contorno necesarias para poder replicar resultados tanto en este programa como en otros que existen actualmente en el mercado.

A continuación, se describen las diferentes etapas para la creación del modelo numérico que se ha utilizado en este Trabajo Final de Grado.

4.2 Creación del modelo numérico mediante COMSOL Multiphysics®

Este apartado se centra en la construcción y configuración de modelos. Permite importar geometrías, definir propiedades de materiales, asignar condiciones de contorno y establecer parámetros variables. Aquí es donde los usuarios construyen la representación virtual de su sistema físico. En primer lugar, se selecciona para el modelo de simulación la dimensión del espacio. Para este trabajo se ha seleccionado el modelo 2D axisimétrico, con la finalidad de reducir los grados de libertad, tal y como se muestra en la Figura 7. Modelos más sencillos, permiten reducir los tiempos de cálculo. En este caso, se aprovechan sus propiedades geométricas que permiten evitar un modelado 3D dado que la lente tiene simetría axial.

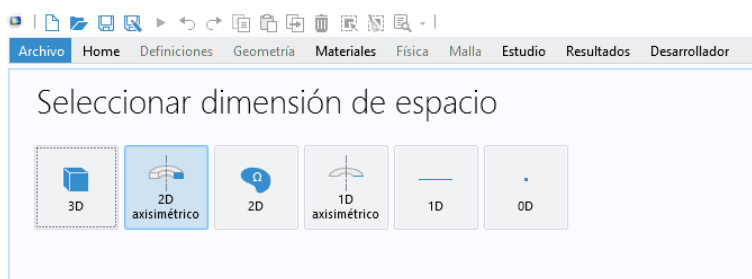


Figura 7. Elección de dimensión de espacio en COMSOL Multiphysics®

Se quiere calcular la variación de presión para la propagación de ondas acústicas en fluidos en condiciones de fondo en reposo. En la Figura 8 se muestra el módulo físico escogido para la realización del presente trabajo, en este caso se trata del módulo acústico. Este módulo tiene varios paquetes físicos y se selecciona el dominio en frecuencia. De esta forma, se resolverá la ecuación de Helmholtz en estado estacionario para obtener el valor de la presión y energía acústica.

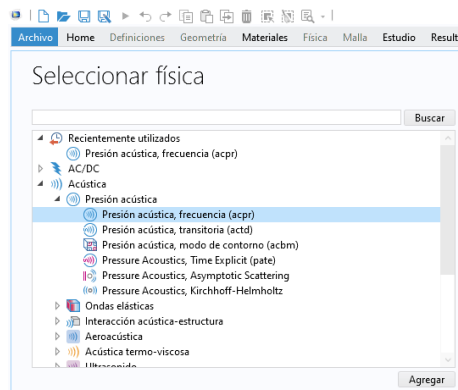


Figura 8. Elección de la física usada

4.2.1 Construcción del modelo

COMSOL Multiphysics® se compone de varias fases de construcción del modelo que proporcionan diferentes funciones y herramientas para modelar, simular y analizar fenómenos físicos complejos. En la Figura 9 se muestran todos los disponibles.

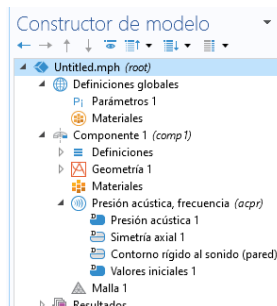


Figura 9. Diferentes apartados de construcción de COMSOL Multiphysics®

A continuación, se van a desarrollar las diferentes fases para la construcción del modelo físico con diferentes capturas que sirven para entender el proceso de construcción e implementación del problema planteado.

4.2.1.1 Definiciones globales

En definiciones globales se encuentra el apartado parámetros, el cual sirve para definir los parámetros globales. Se añaden parámetros o fórmulas, tal y como se muestra en la Figura 10. Esto simplifica el proceso de revisión o modificación de los modelos dado que el programa permite definir parámetros en base a variables globales tal y como se realiza en programación.

Se han añadido a este apartado, fórmulas como la de cálculo de las Zonas de Fresnel que se obtiene despejando la Ecuación (2), utilizando una F_L de 5 cm, una c_{water} de 1500 m/s y una frecuencia de 250 kHz. La elección de la frecuencia está justificada ya que en el laboratorio se dispone de un transductor de pistón con una frecuencia central de 250 kHz, tal y como se comentará en el apartado 5.1, descripción de la parte experimental.

Parámetros

Etiqueta: Parámetros 1

Nombre	Expresión	Valor	Descripción
h_host	1 [m]	1 m	
c_water	1500 [m/s]	1500 m/s	
rho_water	1000	1000	
frec	250E3 [Hz]	2.5E5 Hz	
lambda_w...	c_water/frec	0.006 m	
FL	8.33*lambda_w...	0.04998 m	
radio1	sqrt(1*lambda_w...	0.017575 m	
radio2	sqrt(2*lambda_w...	0.025214 m	
radio3	sqrt(3*lambda_w...	0.031315 m	
radio4	sqrt(4*lambda_w...	0.036654 m	
rho_acero	7850	7850	
c_acero	5790 [m/s]	5790 m/s	

Figura 10. Tabla de parámetros definidos en COMSOL Multiphysics® mediante fórmulas o parámetros

4.2.1.2 Geometría

La etapa geometría se centra en la construcción y configuración de modelos. Permite importar geometrías, definir propiedades de materiales, asignar condiciones de contorno y establecer parámetros variables. Aquí es donde los usuarios construyen la representación virtual de su sistema físico. Se ha de destacar, que el sistema de construcción es rudimentario basado en geometrías simples con múltiples herramientas, pero en caso de necesitar geometrías complejas es posible directamente la importación de las geometrías en formato vectorial CAD, por ejemplo.

Se propone hacer un rectángulo, para el cual se conoce que al tratarse de un modelo 2D axisimétrico el $r = 0$, es su radio de rotación con sentido de rotación horario o antihorario. En concreto, en primer lugar, se construye un rectángulo “host”, centrado en el córner, por el cual se transmitirá la onda de abajo hacia arriba, emulando un cilindro, como se muestra en la Figura 11.

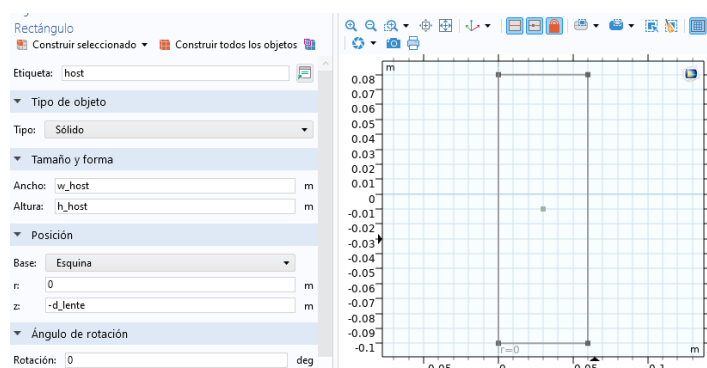


Figura 11. Creación de rectángulo en COMSOL Multiphysics®

En segundo lugar, se crean los 13 radios de la lente. Añadiendo el ancho correspondiente a cada radio calculado en la fórmula de cálculo de las zonas de Fresnel, Ecuación (2), como se indica en la Figura 12.

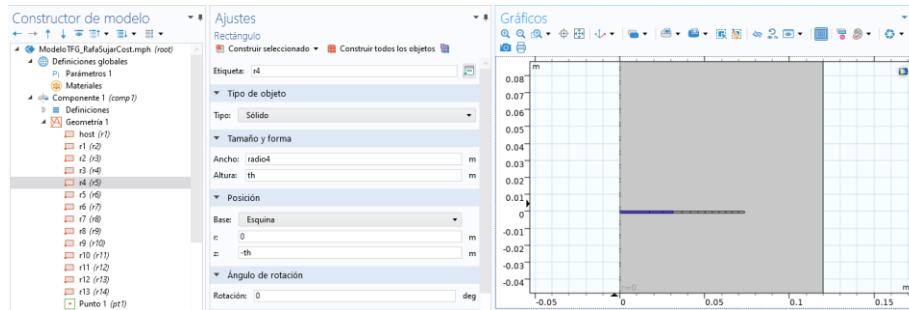


Figura 12. Creación de los radios de la lente en COMSOL Multiphysics®

Por último, si se desea crear una partición de un dominio se crearía un punto en el contorno del dominio del rectángulo exterior. En este trabajo se ha optado por introducir una incidencia de onda plana como modelo de primera aproximación. Pero si se quisiera añadir un contorno de presión que emulase un transductor se utilizaría para separar en dos contornos diferentes. En la Figura 13 se muestra que es posible añadir también puntos como geometrías.

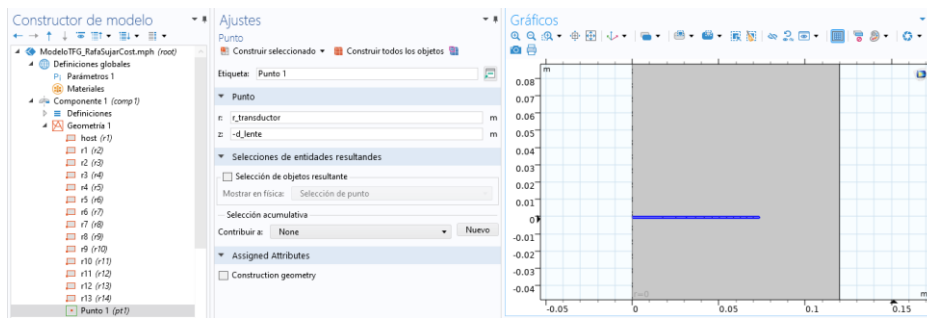


Figura 13. Creación de un punto en COMSOL Multiphysics®

4.2.1.3 Materiales

Para este apartado existe una librería de la cual se puede introducir datos de materiales ya predefinidos provenientes de un extenso catálogo. También se puede añadir un material en blanco al cual se pueden añadir manualmente las propiedades físicas del de material (por ejemplo, si se ha caracterizado un material en laboratorio por medios propios o no está incluido en la librería). Como se trabaja con el módulo acústico, es necesaria para la resolución de la ecuación de Helmholtz los parámetros de densidad y velocidad del sonido en el agua, tal y como se muestra en la Figura 14.

Además, se debería de modificar el apartado de selección de entidades geométricas para que este material este en una localización específica y no en todas las entidades creadas. En esta simulación se ha implementado el agua de forma manual, que definimos como agua con una densidad $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ y una velocidad de propagación del sonido $c_{water} = 1500 \text{ m/s}$. En el caso de la lente, se puede dejar como infinitamente rígida. Esto es justificable por la ratio de impedancias latón (material de construcción de la lente) y agua [1]. Solamente en el caso de que el dispositivo fuera construido en algún tipo de polímero y no metal, debería de considerarse tanto definir el material como considerar la interacción sólido-estructura que no ha sido considerada en el presente trabajo.

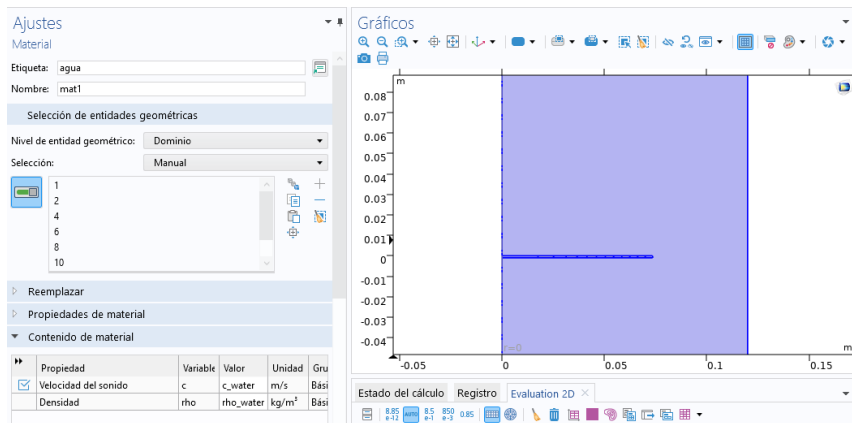


Figura 14. Creación del agua como material en COMSOL Multiphysics®

4.2.1.4 Módulo acústico

Para resolver el problema físico, el módulo acústico del software resuelve la ecuación de Helmholtz para cada elemento del sistema.

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla \rho_t - q_d) \right) - \frac{k_{eq}^2 \rho_t}{\rho_c} = Q_m \quad (6)$$

$$\rho_t = \rho + \rho_b \quad (7)$$

$$k_{eq}^2 = \left(\frac{W}{c_c} \right)^2 - k_m^2 \quad (8)$$

En el apartado Contorno rígido al sonido, Figura 15, se verá marcado con líneas azules todo aquello que sea infinitamente rígido, pero las paredes en $r = 0$ no puede ser rígida, por lo que se tendría que modificar.

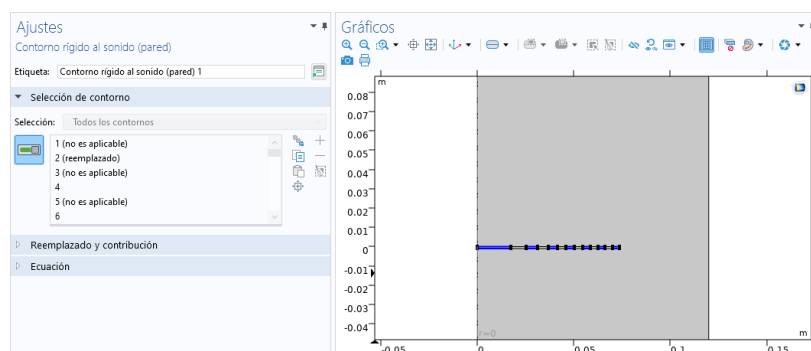


Figura 15. Implantación de los contornos rígidos al sonido en COMSOL Multiphysics®

Para ello, tendríamos que hacer que el medio sea infinito mediante las condiciones de radiación de onda plana para que cualquier onda que llegue a las paredes del medio se generen reflexiones en los límites del dominio. Para generar la onda plana que atraviesa el sistema, en el apartado de Background Pressure Field se seleccionarían el dominio de onda plana que es todo el dominio del agua, como se muestra en la Figura 16.

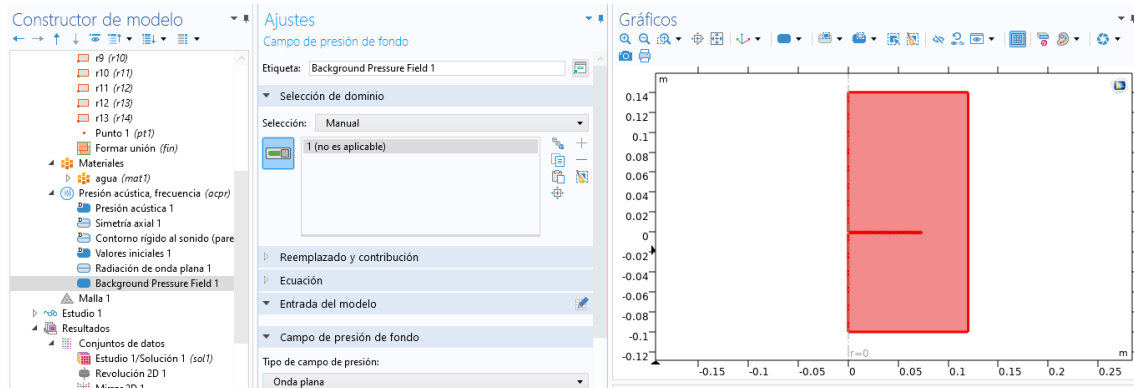


Figura 16. Implantación del campo de presión de fondo en COMSOL Multiphysics®

4.2.1.5 Mallado

El mallado es el proceso de subdividir la geometría del modelo en elementos finitos para resolver las ecuaciones matemáticas. COMSOL Multiphysics® proporciona varias técnicas de mallado para diferentes tipos de geometrías y problemas. Los usuarios pueden ajustar los parámetros del mallado para lograr una simulación precisa y eficiente como se muestra en la Figura 17.

El número de elementos que se generan para discretizar los dominios son grados de libertad que se añaden en la simulación. A mayor número de grados de libertad, mayor consumo de recursos computacionales. Es por ello, que esto justifica aprovechar la naturaleza geométrica del problema, en este caso axisimetría para así, simplificar el problema. La geometría de discretización del dominio se ha seleccionado de tipo triangular, muy útil en el caso de sistema bidimensionales dado que se adapta muy bien a cualquier tipo de dominio. En cuanto al tamaño del mallado, es necesario seleccionar un tamaño máximo de elemento que evite dispersión numérica. Para ello, se ha seleccionado un tamaño inferior a $\lambda/6$ como tamaño máximo de elementos. No obstante, a partir de la versión 6.0 de COMSOL, el software ya detecta el tipo de módulo físico e incluye esta limitación si se selecciona la frecuencia máxima de trabajo (Figura 16) dado que la frecuencia máxima coincide con la menor longitud de onda.

Se realiza el cálculo a 250 kHz dado que el montaje experimental, que se explicará con detalle en el capítulo 5, utiliza esta frecuencia, como se indica en la Figura 16. Esto supone una longitud de onda en el agua de 6 mm aproximadamente. El tamaño máximo de elemento es de 1 mm.

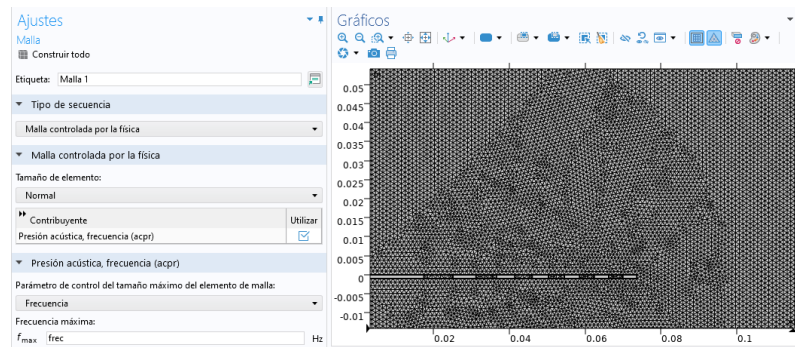


Figura 17. Construcción del mallado en COMSOL Multiphysics®

4.2.1.6 Estudio

COMSOL Multiphysics® permite realizar estudios paramétricos y optimizaciones para explorar cómo los resultados varían en función de los parámetros del modelo. Los usuarios pueden realizar análisis de sensibilidad, estudios de diseño paramétrico, optimización y búsqueda de puntos óptimos en el espacio de diseño. En este trabajo, únicamente se ha seleccionado la opción de resolver el problema con una frecuencia sin requerir de estas múltiples opciones.

Se añade un estudio en dominio de la frecuencia y se le selecciona la frecuencia de 250 kHz (definido en el apartado de definiciones globales como “frec”) y se calcula el estudio dándose los resultados, como en la Figura 18.

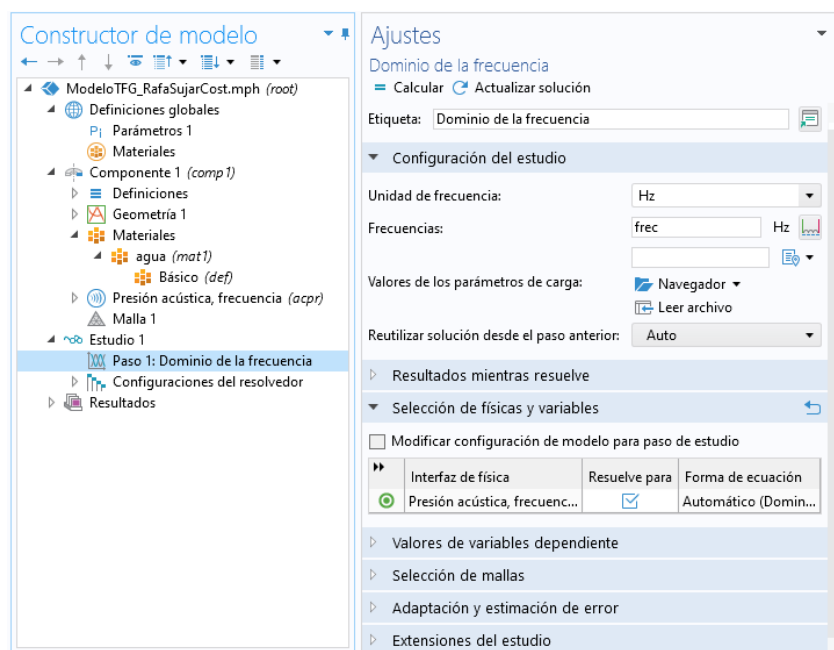


Figura 18. Cálculo de un estudio en COMSOL Multiphysics®

Para resumir todas las características implementadas, se muestra el esquema de la Figura 19. Se ha utilizado el método de los elementos finitos (FEM) para obtener una solución numérica del problema físico. El método de los elementos finitos nos permite estudiar los fenómenos físicos implicados en la interacción de las ondas con la SZP. Por ello se ha implementado un modelo matemático que replica las condiciones del problema.

Este método también nos permite determinar la distribución de presiones de los campos difractados generados por la SZP cuando hay un emisor de pistón, provocando fenómenos de interferencia. Se considera la ecuación acústica de Helmholtz, Ecuación (6), Ecuación (7) y Ecuación (8), usando los valores $c_{water} = 1500$ m/s, $\rho = 1000$ kg / m³ y una frecuencia de 250 kHz.

En este esquema, se muestra el modelo de primera aproximación implementando únicamente una semilente, ya que se han utilizado las propiedades geométricas del modelo aprovechando su eje de simetría axial, tal y como se ha comentado en el apartado de elección de la simetría. Se obtiene una solución completa rotándolo desde su eje de simetría. En la Figura 19 se detallan las condiciones de contorno e iniciales del modelo a modo de resumen. Los contornos del modelo se definen como condición límite de radiación de ondas para emular un medio infinito. En el caso de la lente SZP, los contornos se consideran infinitamente rígidos [1]. También se muestra la dirección de la onda plana incidente respecto al modelo y la nomenclatura de los ejes utilizados.

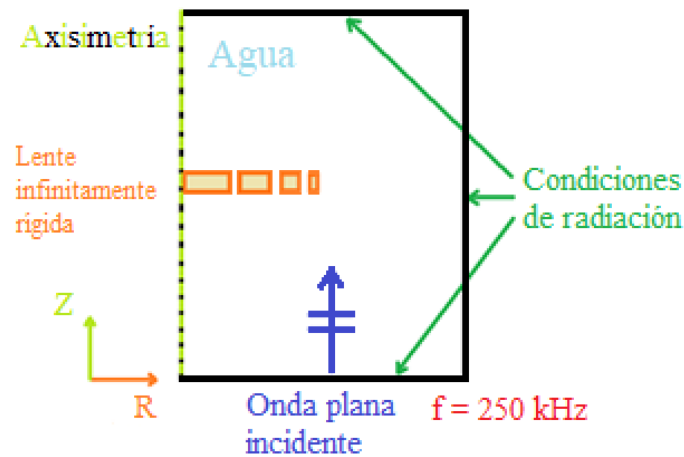


Figura 19. Esquema de la simulación numérica donde se indican las condiciones de contorno y los materiales

Capítulo 5. Montaje experimental

5.1 Sistema de medición y sus partes

Para realizar los experimentos, dadas las dificultades técnicas para controlar los dispositivos submarinos, se necesita un complejo sistema de medida y adquisición. En la Figura 20a se muestra el conjunto experimental utilizado indicado las partes que contiene. Este sistema de experimental robotizado, denominado Arquímedes, se encuentra ubicado en la Universidad Politécnica de Valencia, dentro del edificio 4D, en el laboratorio de Acústica del Departamento de Física Aplicada. Pertenece al grupo de investigación en acústica del Centro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica

El montaje experimental se muestra en la Figura 20a. Este consiste en un sistema de posicionamiento automatizado submarino 3D ensamblado en un tanque de agua de dimensiones $0.5 \times 0.5 \times 1 \text{ m}^3$. El tanque sería el entorno controlado donde se llevarían a cabo las pruebas y mediciones. Este tanque tiene dimensiones y profundidad adecuadas para permitir el desplazamiento y la operación del dispositivo submarino y el sistema de ultrasonidos.

El sistema incluye un robot que dispone de un sistema automatizado para la medida de ultrasonidos de alta precisión. El robot se programa para seguir una secuencia de movimientos predefinida y garantizar una posición precisa del transductor. El robot puede programarse para medir pasos de hasta 1 mm.

Como emisor se utiliza un transductor de pistón Imasonic con un diámetro activo de 32 mm y una frecuencia central de 250 kHz. La señal de alimentación del transductor se genera utilizando un pulsador Panametrics 5077PR. Una vez que el transductor está en su posición correcta, emite un pulso de ultrasonido hacia el objeto de prueba. Las ondas de ultrasonido se propagan a través del objeto y luego se reflejan en las interfaces internas o en las imperfecciones detectables.

Siguiendo con el conjunto experimental, se utiliza como receptor un hidrófono de aguja de 1,0 mm. Este hidrófono, ver Figura 20c, es capaz de medir altas frecuencias, incluso si tienen un nivel de señal muy débil. La sensibilidad del hidrófono es de 850 nV/Pa con una tolerancia de $\pm 3 \text{ dB}$. Se puede observar en la Figura 20b la colocación de este.



Figura 20. Configuración experimental donde se han realizado las pruebas desde un plano general (a) y desde dentro del tanque (b), donde se puede observar el hidrófono, la lente y el pistón. En (c) se muestra el hidrófono de aguja y en (d) la lente de Fresnel.



El hidrófono de aguja está conectado a un preamplificador de bajo ruido y luego a un osciloscopio digital: Picoscope model 3224, Pico Technology.

Los resultados de la simulación experimental hechos en el sistema submarino son procesados con la aplicación Matlab®, la cual proporcionará dos archivos: un mapa de presión absoluta y una gráfica de corte longitudinal de la presión absoluta partido de su máximo en función de la distancia.

Capítulo 6. Resultados

6.1 Resultados numéricos

6.1.1 Resultados numéricos para SZP en COMSOL Multiphysics®

En la Figura 21 se muestra el plano de presión absoluta normalizada para la lente SZP. Se puede observar que se genera un foco único situado en la posición focal diseñada con centro del eje Z de 0.05 m y en el plano horizontal con $R = 0$ m, tal y como se buscaba ya que hemos diseñado el estudio para una F_L , distancia focal, a 5 cm.

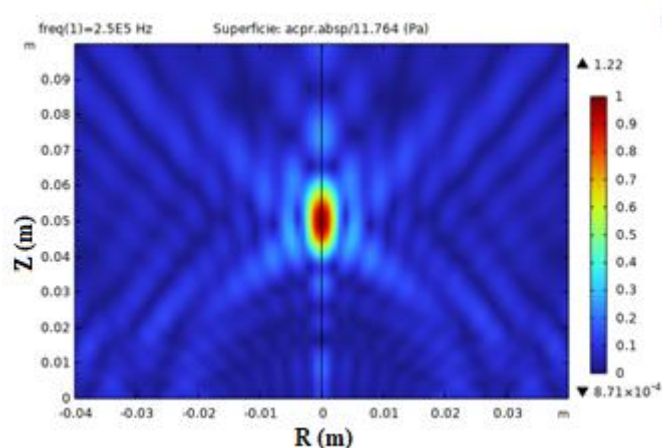


Figura 21. Solución mapa de presión absoluto para SZP en COMSOL Multiphysics®

A continuación, en la Figura 22 se muestra el corte longitudinal situado a lo largo del eje horizontal en $R=0$ m. El resultado normalizado en valores entre 0 y 1 muestran el foco situado en 5 cm. Se puede observar que la distribución de presión está muy concentrada entre 4 y 6 cm siendo un foco de longitud reducida tal y como se espera de una lente de Fresnel y atendiendo a resultados publicados en anteriores trabajos de diversos autores.

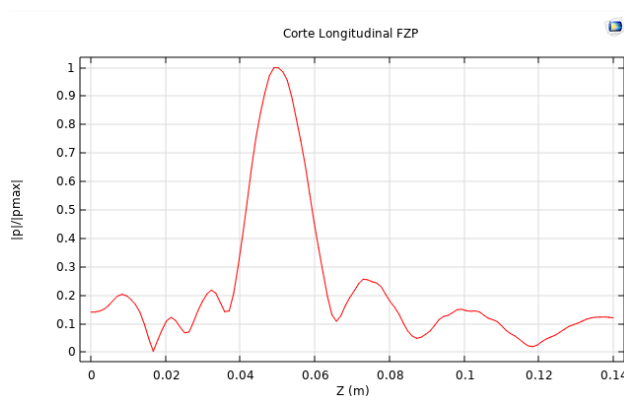


Figura 22. Gráfica de corte longitudinal de la presión partida de su máximo en función de la distancia para SZP

6.1.2 Resultados numéricos para PSZP en COMSOL Multiphysics®

En la Figura 23 se muestra el plano de presión absoluta normalizada para la lente PSZP (con máscara de pupila). Dado que se generan diferentes focos situados de forma periódica, la distribución de la presión obtiene un foco de mayor longitud si lo comparamos con la Figura 21. Además, dicho foco mantiene la posición focal con centro en el plano vertical de 0.05 m y en el plano horizontal con $R = 0$ m, coincidiendo el valor del eje Z con la distancia focal establecida en 5 cm.

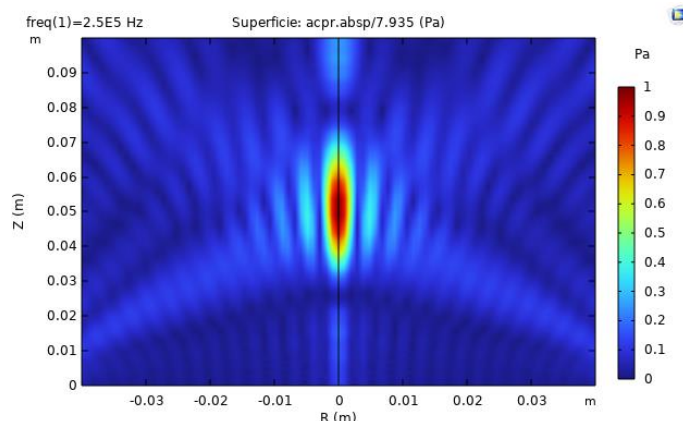


Figura 23. Solución mapa de presión absoluta para PSZP en COMSOL Multiphysics®

A continuación, en la Figura 24 se muestra el corte longitudinal situado a lo largo del eje horizontal en $R=0$ m. El eje vertical es el valor de la presión en valor absoluto dividida por el máximo valor absoluto, es decir, se ha normalizado, y dicho eje está acotado entre valores del 0 al 1. Como se puede observar continúa situado el máximo en el eje Z a 5 cm, correspondiéndose con el valor de la distancia focal establecida. Se puede observar que, comparando la Figura 24 con la Figura 22, que el foco se distribuye entre 2 y 8 cm.

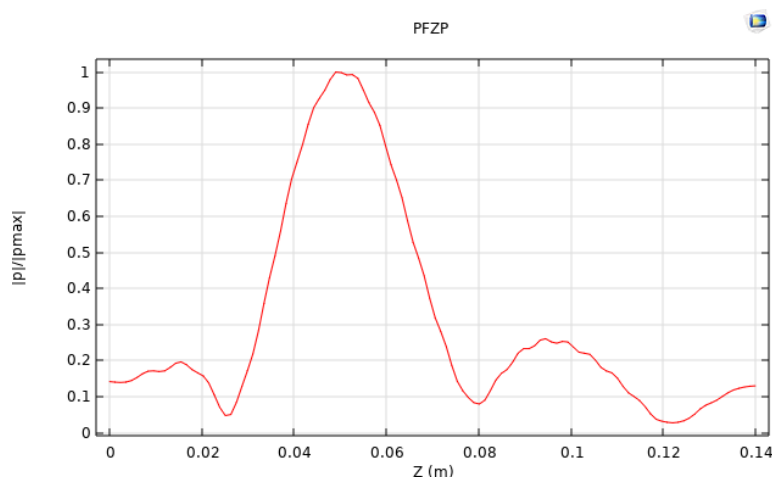


Figura 24. Gráfica de corte longitudinal de la presión partida de su máximo en función de la distancia para PSZP

6.2 Resultados experimentales

Los resultados experimentales son los datos procesados obtenidos mediante la medida del robot y procesados con el software matemático del ordenador de medida y finalmente con Matlab®. A continuación, se muestran los resultados obtenidos de forma experimental. Se ha de destacar que en este trabajo únicamente se han tratado los datos mediante Matlab para mostrarlos dado que se han utilizado los scripts propios ya creados para este propósito y no era uno de los objetivos desarrollar nuevos.

6.2.1 Resultados experimentales para la SZP

En la Figura 25 se muestra el plano de presión absoluta normalizada para la lente SZP de manera experimentalmente con Matlab®. Se puede observar que se genera un foco único desplazado de la posición focal diseñada con centro en el eje Z de 5 cm y en el plano horizontal con $R = 0$ m buscada en el resultado numérico obtenido con COMSOL Multiphysics®. El foco tiene un centro en la posición 4 cm en el eje Z. Se ha desplazado 1 cm respecto a los resultados numéricos. Este desplazamiento se comenta en la comparación de resultados.

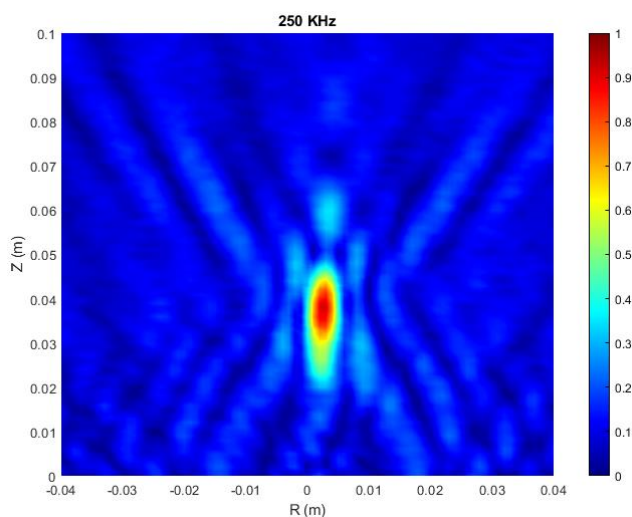


Figura 25. Solución experimental del mapa de presión absoluta para la SZP

A continuación, en la Figura 26 se muestra el corte longitudinal situado a lo largo del eje horizontal en $R=0.003$ m. El eje vertical es el valor de la presión en valor absoluto partido del absoluto de su máximo, por eso está gráfica ha sido normalizada, y dicho eje está acotado entre valores del 0 al 1. Se observa que el máximo no llega a 1, que sería su valor máximo normalizado, este suceso se comentará en el apartado de comparaciones y se detallará su explicación.

Además, se puede observar hay un máximo en el eje Z en 4 cm, donde en el mapa de presión absoluta se encuentra el centro del foco, el cual muestra el desplazamiento de 1 cm anteriormente comentado.

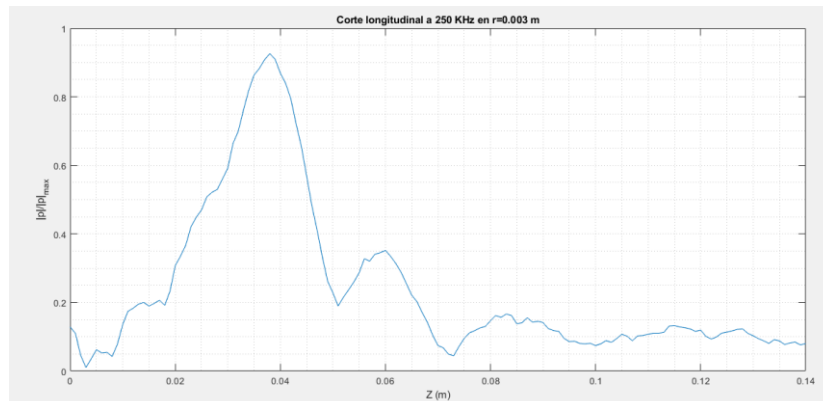


Figura 26. Gráfica experimental de corte longitudinal de la presión partida de su máximo en función de la distancia para SZP

6.2.2 Resultados experimentales para PSZP

En la Figura 27 se muestra el plano de presión absoluta normalizada para la lente PSZP con máscara de pupila medido con Matlab®. Se puede observar con más claridad que en los resultados numéricos que se generan más de un foco a lo largo del eje horizontal, manteniendo una distancia simultánea entre sí. El foco principal es más largo que el generado para una lente de Fresnel. Dicho foco tiene la posición focal con centro en el plano en 4 cm y en el plano horizontal con $R = 0.003$ m.

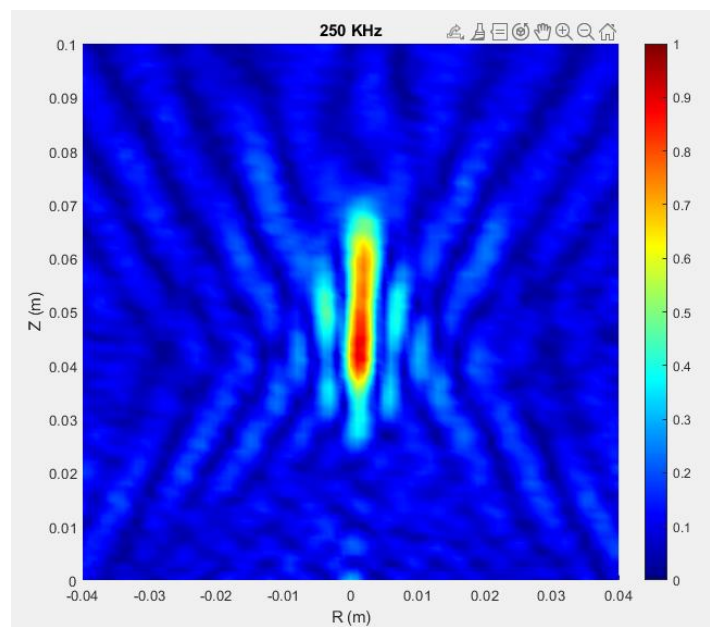


Figura 27. Solución experimental del mapa de presión absoluta para PSZP

A continuación, en la Figura 28 se muestra el corte longitudinal situado a lo largo del eje horizontal en $R=0$ m. Igual que para el caso anterior, el eje vertical ha sido normalizado, estando acotado entre los valores del 0 al 1. Se observa que el máximo no llega a 1, que sería su valor máximo normalizado, este suceso se comentará en el apartado de comparaciones y se detallará su explicación. Además, se puede observar hay un máximo en el eje Z en 4 cm, donde en el mapa de presión absoluta se encuentra el centro del foco, el cual muestra el desplazamiento de 1 cm anteriormente comentado. También se puede observar que, a partir de una distancia considerable, el comportamiento es casi el mismo variando en valores, pero siendo estos muy pequeños y parecidos entre sí. La zona máxima de presión tiene una longitud que se sitúa entre 2 y 8 cm.

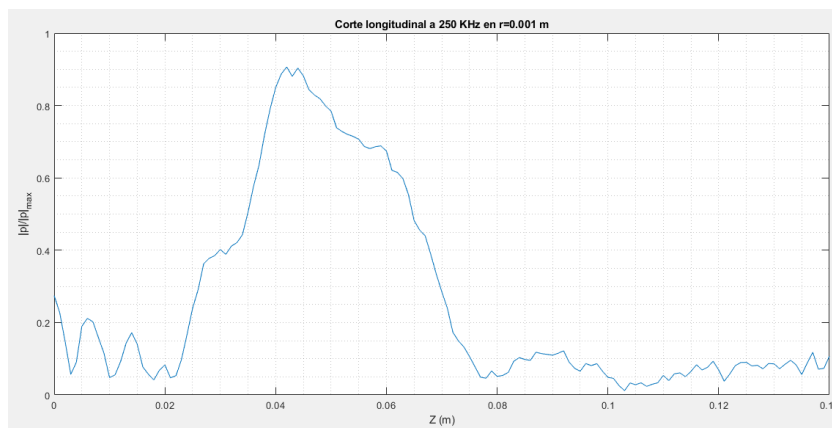


Figura 28. Gráfica experimental de corte longitudinal de la presión partida de su máximo en función de la distancia para PFZP

6.3 Comparación de resultados

6.3.1 SZP

En la Figura 29, se muestra comparativamente los cortes longitudinales obtenidos experimentalmente (rojo) y numéricamente (azul) para la SZP. El corte longitudinal experimental corresponde a la Figura 26 y el corte longitudinal numérico corresponde a la Figura 22. Se observa cierto desplazamiento. Se puede observar que hay dos picos, cada uno con sus dos respectivos máximos para cada caso.

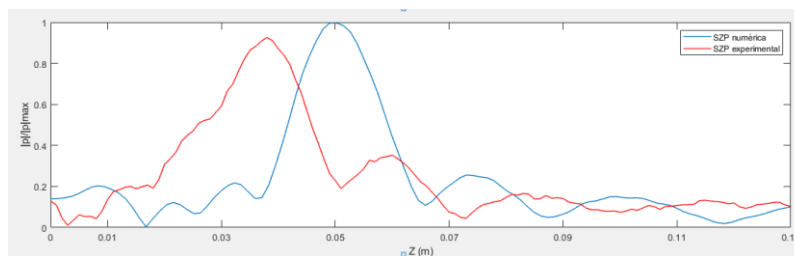


Figura 29. Comparativa entre resultados numéricos y experimentales de lente SZP

No coinciden dichos máximos por dos motivos. Primeramente, porque hay un offset, que se ha corregido con MATLAB una vez obtenidos los resultados del software del ordenador. Dicho offset aparece debido a que, al medir en el tanque de agua, no se ha acercado la aguja del hidrófono al máximo a la lente, para evitar su posible rotura o daño (debido al alto costo de este). Dado que se trata de un trabajo académico se han mantenido unas condiciones de seguridad más elevadas que en un trabajo científico dado que el estudiante ha manejado el robot bajo supervisión de los tutores. Para corregir dicho offset se ha desplazado la medida experimental 1 cm, ya que el máximo en la gráfica de corte longitudinal de los resultados experimentales salía en 4 cm, por lo que corrigiendo dicho offset ambas gráficas tendría el máximo en 5 cm, coincidiendo entre sí y con la distancia focal establecida al principio del estudio.

El segundo motivo es debido a la divergencia esférica. Como se ha comentado en el apartado de Ecuaciones y esquemas (apartado 3.4), se ha implementado la Ecuación (2) para la construcción y simulación del modelo y no la Ecuación (3). Esto tiene de inconveniente que surja el desplazamiento focal, justificado al final con la necesidad de implementar una SZP con corrección esférica que sitúe el centro del foco en la distancia focal esperada.

La Figura 30 muestra cómo sería la comparativa de ambas gráficas de corte longitudinal, los resultados para SZP experimentalmente (rojo) y numéricamente (azul), al centrarlas en 5 cm de distancia focal. Como se puede observar, ambas gráficas se asemejan entre sí, pero la conseguida experimentalmente parece estar un poco más desplazada de 5 cm. Además, la gráfica muestra que para el caso de los resultados numéricamente sí que se ha conseguido alcanzar el máximo, ya que el máximo de la gráfica azul llega a tocar el superior de la gráfica consiguiendo que en ese punto la presión sea máxima, no como en la gráfica conseguida mediante resultados experimentales la cual no alcanza la unidad. Esto es debido a que se ha realizado una simulación de onda plana para los resultados numéricos y para los resultados experimentales se ha realizado con datos de onda no plana debido al pistón.

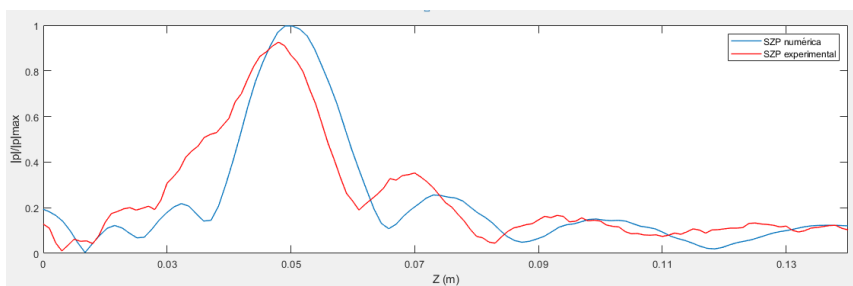


Figura 30. Comparativa de desplazar a 5 cm ambos máximos

6.3.2 PSZP

En la Figura 31, se muestra comparativamente los cortes longitudinales obtenidos experimentalmente (rojo) y numéricamente (azul) para PSZP. El corte longitudinal experimental corresponde a la Figura 28 y el corte longitudinal numérico corresponde a la Figura 24. Se observa que el máximo de la gráfica de los resultados experimentales no coincide con el máximo de la gráfica de los resultados numéricos, por lo que se desplazará la gráfica de resultados experimentales (roja) 1 cm debido al offset comentado en el apartado anterior.

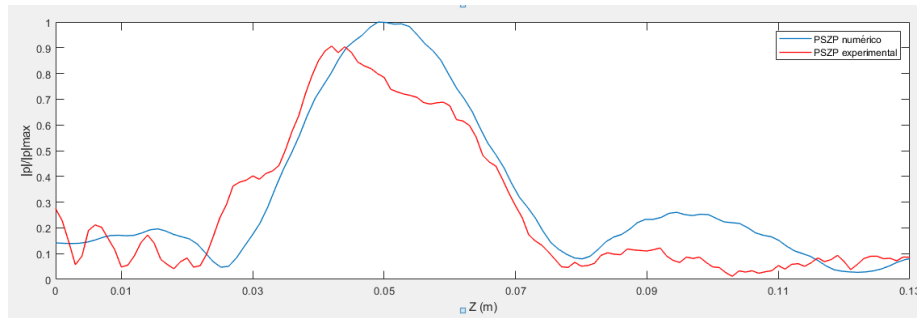


Figura 31. Comparativa entre resultados numéricos y experimentales de lente PFZP

La figura 32 muestra cómo sería la comparativa de ambas gráficas de corte longitudinal, los resultados para SZP experimentalmente (rojo) y numéricamente (azul), al centrarlas en 5 cm de distancia focal, al haber movido la gráfica de resultados experimental 1 cm, debido al offset, observamos que los máximos se sincronizan en un mismo punto. El comportamiento de ambas gráficas es similar, aunque el conseguido en los resultados experimentales se aprecia más uniforme.

Además, la gráfica muestra que para el caso de los resultados numéricos sí que se ha conseguido alcanzar el máximo, ya que el máximo de la gráfica azul llega a tocar el superior de la gráfica consiguiendo que en ese punto la presión sea máxima, no como en la gráfica conseguida mediante resultados experimentales la cual no alcanza la unidad. Esto es debido a que se ha realizado una simulación de onda plana para los resultados numéricos y para los resultados experimentales se ha realizado con datos de onda no plana debido al pistón.

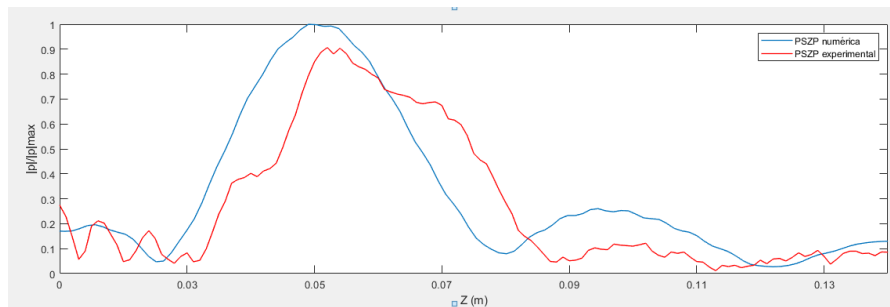


Figura 32. Comparativa de desplazar a 5 cm ambos máximos

Capítulo 7. Conclusiones

En este trabajo, hemos demostrado que la modulación de haces de ultrasonido utilizando lentes de Fresnel es una técnica efectiva para controlar la dirección y la intensidad de los haces ultrasónicos. Esta técnica ofrece un alto grado de flexibilidad y precisión en la focalización y direccionamiento de los haces ultrasónicos, lo que la hace valiosa en diversas aplicaciones médicas e industriales.

Hemos observado que el uso de lentes de Fresnel permite una mejora significativa en la focalización de los haces de ultrasonido. Esto puede tener un impacto importante en aplicaciones médicas como la terapia de ablación, donde la precisión en la focalización es esencial.

En este trabajo se ha estudiado el comportamiento de una lente de Fresnel y una lente de Fresnel modificada con una pupila, el comportamiento de ambas y se han caracterizado modelos diferentes para su trabajo, entendimiento y estudio. Las lentes FZP de este trabajo han sido implementadas con tipología Soret conocidas como SZP (máscara binaria siendo rígidos los anillos que bloquean las contribuciones destructivas al foco).

Con una lente de Fresnel se consigue con un diseño sencillo que se genere un foco con una geometría plana. Se ha conseguido converger en un único punto, focalizar. Por otro lado, con una lente de Fresnel con máscara de pupila se ha conseguido alargar ese foco, convirtiéndolo en multifoco. Al tapar el centro de la lente y dejar sólo 4 radios con una pupila, se ha comprobado numérica y experimentalmente el comportamiento de los haces de ultrasonidos. Dichos resultados se han estudiado, comparado y contrastado.

Se ha aprendido a utilizar un sistema experimental de medidas de alta precisión para caracterizar dispositivos acústicos en entorno controlado sumergido, trabajando de manera coordinada con profesionales de la materia. Se ha aprendido a usar un software comercial el cual no había trabajado durante la carrera.

Se ha profundizado en el desarrollo de habilidades, conceptos y programación usando Matlab®, la cual se ha usado de manera más cómoda debido a que es una asignatura que se ha trabajado durante la carrera.

En este trabajo se ha aprendido a modelizar el comportamiento de los dispositivos mediante el método de elementos finitos. Se ha aprendido a trabajar con COMSOL Multiphysics®, la aplicación de uso profesional y comercial de modelado y análisis para prototipaje virtual de fenómenos físicos. La cual no había trabajado con ella y se ha tenido que estudiar y aprender para un correcto aprendizaje y uso de dicha aplicación.

7.1 Limitaciones y problemas

El mayor problema que ha surgido durante la realización de este trabajo ha sido que se ha modelizado una simulación para la ecuación de onda plana y que en la práctica el software trabaja con la ecuación de ondas esféricas, ya que se trabaja con ondas con pistón, por lo que los resultados no han salido con la exactitud esperada. No obstante, se ha sabido corregir dicha limitación y se ha conseguido obtener unos resultados acordes a lo esperado.

Otro problema que ha surgido durante este trabajo ha sido que para obtener los resultados experimentales no se ha llegado a conseguir los resultados más precisos debido a que la aguja del hidrófono tiene una sensibilidad notable y por miedo a algún golpe y poder romperse, se ha trabajado con un offset en las mediciones. No obstante, mediante el uso de Matlab®, se ha conseguido desplazar la gráfica para que los máximos y las distancias focales de ambas gráficas fuesen las mismas.



7.2 Líneas futuras

El modelo se podría mejorar, consiguiendo pasar de un modelo de primera aproximación a un modelo más complejo. Se podrían hacer más mediciones y por lo tanto un mayor estudio del comportamiento de varias lentes. Se podría cambiar el tamaño o la forma de la lente y estudiar su comportamiento y compararlos.

Realizando el mismo estudio realizado, pero en lugar de modelizar con la ecuación de onda plana, cambiarlo por la ecuación de ondas esféricas así consiguiendo sincronizar los resultados experimentales con los numéricos y poder realizar un estudio con la ecuación de ondas esféricas.



Bibliografía:

- [1] D. Tarrazó-Serrano, S. Castiñeira-Ibáñez, E. Sánchez-Aparisi, A. Uris y C. Rubio, «MRI Compatible Planar Material Acoustic Lenses,» Appl. Sci., vol. 2634, p. 8, 2018.
- [2] De la Fuente, R.; Altermatt, F.; Corvetto, M.; Sierra, R.; Petersen, K.; Fierro, C.; De la Cuadra, J.C. (2009) *Conceptos Básicos de Ultrasonografía Aplicada a la Anestesia Regional*. (Consultada el 14 de febrero de 2023).
<https://revistachilenadeanestesia.cl/conceptos-basicos-de-ultrasonografia-aplicada-a-la-anestesia-regional/>
https://www.sachile.cl/upfiles/revistas/4ac678bc0ebdf_revison_fuente_altermatt.pdf
- [3] Domínguez Solís, J.R. (2011) Lente acústica tridimensional con aplicaciones médicas. (Consultada el 18 de febrero de 2023).
<https://rdcsic.dicat.csic.es/tecnologias-fisicas-2/93-ofertas-tecnologicas/117-ver-y-cortar-con-el-sonido-lente-acustica-tridimensional-con-aplicaciones-medicas>
- [4] Barreiro Hervas, J.C.; Saavedra Tortosa, G.; Pons, A. (2015) *Lente de Fresnel*. (Consultada el 26 de febrero de 2023).
<https://www.uv.es/uvweb/fisica/es/demonstraciones-experimentales-fisica-aula/catalogo-demos/optica/lente-fresnel-1286111789106/DemoExp.html?id=1286111062671#:~:text=La%20lente%20de%20Fresnel%20es,una%20lente%20de%20dise%C3%B1o%20convencional.>
- [5] Candelas, P.; Pérez-López, S.; Fuster, J. (2021). On the Design of Soret Zone Plates Based on Binary Sequences Using Directional Transducers. *Sensors*. 21. 6086. 10.3390/s21186086.
- [6] Objetivos de Desarrollo Sostenible (2015). Objetivo 3: Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades. Ginebra: Naciones Unidas. (Consultada el 1 de septiembre de 2023).
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/health/>
- [7] Leshno, A., Rubinstein, Y., Singer, R., Sher, I., Rotenstreich, Y., Melamed, S., & Skaat, A. (2020). High-intensity focused ultrasound treatment in moderate glaucoma patients: results of a 2-year prospective clinical trial. *Journal of Glaucoma*, 29(7), 556-560.
- [8] E-Tay Industrial CO (s.f) *¿Qué es la lente de Fresnel?* (Consultada el 6 de junio de 2023)
<https://www.mymagnifier.com/es/faq/E-TAY-faq-001.html>
- [9] Universe Optics. (s.f) *¿Qué es la lente de Fresnel?* (Consultada el 6 de junio de 2023)
<https://www.universeoptics.com/es/que-es-una-lente-fresnel/>
- [10] Castiñeira-Ibáñez, S.; Tarrazó-Serrano, D.; Minin, O.; Rubio, C.; Minin, I. Tunable depth of focus of acoustical pupil masked Soret Zone Plate, *Sensors and Actuators* 286, 2019, 187.
- [11] John H. McLeod, "El Axicon: un nuevo tipo de elemento óptico", *J. Opt. Soc. Soy.* 44, 592-597 (1954)
- [12] AddLink (s.f) COMSOL Multiphysics® 6.1. (Consultada el 4 de junio de 2023).
<https://www.addlink.es/productos/comsol-multiphysics>
- [13] Tarrazó-Serrano, D.; Castiñeira-Ibáñez, S.; Minin, O.V.; Candelas, P.; Rubio, C.; Minin, I.V. Design of Acoustical Bessel-Like Beam Formation by a Pupil Masked Soret Zone Plate Lens. *Sensors* 2019, 19, 378.
- [14] Pérez-López, S.; Fuster, J.M.; Candelas, P.; Tarrazó-Serrano, D.; Castiñeira-Ibáñez, S.; Rubio, C. Bifocal Ultrasound Focusing Using Bi-Fresnel Zone Plate Lenses. *Sensors* 2020, 20, 705.