

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

**DISEÑO DE CUBIERTA ENVOLVENTE PARA
DISPOSITIVO ELECTRÓNICO CON
REQUISITOS DE FUNCIONAMIENTO
ACÚSTICO Y DE ESTANQUEIDAD**

Autor: José Antonio Beardo Duque

Tutor: Daniel García Vallejo

**Dpto. Ingeniería Mecánica y Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2018



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

**DISEÑO DE CUBIERTA ENVOLVENTE PARA
DISPOSITIVO ELECTRÓNICO CON
REQUISITOS DE FUNCIONAMIENTO
ACÚSTICO Y DE ESTANQUEIDAD**

Autor:

José Antonio Beardo Duque

Tutor:

Daniel García Vallejo

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Trabajo Fin de Grado: DISEÑO DE CUBIERTA ENVOLVENTE PARA DISPOSITIVO ELECTRÓNICO
CON REQUISITOS DE FUNCIONAMIENTO ACÚSTICO Y DE ESTANQUEIDAD

Autor: José Antonio Beardo Duque

Tutor: Daniel García Vallejo

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

*A mi familia y amigos, por su
apoyo incondicional.*

Agradecimientos

Quiero agradecer este trabajo a mi familia y amigos, en especial a mi madre, a Lucía y a Enrique, por su apoyo durante la realización del proyecto.

También quiero hacer mención a mi tutor, D. Daniel García Vallejo, por pensar en mí para este trabajo y por su ayuda a lo largo de su desarrollo.

Resumen

El estudio del comportamiento de elementos mecánicos en ambientes poco favorables y de carácter variable es de gran relevancia a la hora de diseñar sistemas que han de ser implementados en este tipo de condiciones.

El objetivo de este proyecto es el análisis del diseño más adecuado de una envolvente para un conjunto de sistemas electrónicos que deben trabajar sumergidos a poca profundidad, cuya función es la de emitir ultrasonidos para evitar la eutrofización en balsas de riego y embalses a través de emisores en contacto con el agua.

El estudio se realiza en colaboración con una empresa externa a la ETSI, que ha diseñado los elementos electrónicos, pero cuyo primer diseño de carcasa no ha sido capaz de soportar las condiciones ambientales a las que ha sido expuesto.

En el trabajo se identifican y analizan los diferentes problemas del dispositivo ya existente y se estudian las modificaciones necesarias para solventarlos, comenzando por la realización de varios diseños iniciales con potencial de cumplir los requisitos exigidos para realizar un estudio intensivo sobre aquel que tanto la empresa como los integrantes del proyecto consideren el mejor candidato. Este estudio cuenta tanto con el análisis de su forma y dimensiones, como con la determinación del material y método más adecuado para su fabricación. Además, también se realizará un presupuesto aproximado del coste de su realización.

La investigación llevada a cabo en esta parte consiste en crear una carcasa que se adecue a los elementos electrónicos fabricados por la empresa, sin embargo, el proyecto también abarca el estudio de la posibilidad de emisión de ultrasonidos sin la necesidad de que los emisores se encuentren en contacto con el agua, es decir, utilizando la propia envolvente como emisor.

El análisis de ambas alternativas de solución se llevará a cabo empleando métodos de elementos finitos, tanto para la determinación del comportamiento mecánico, como para la obtención del nivel de presión producido en el agua en el último caso expuesto.

El propósito del proyecto encomendado es determinar la solución más adecuada a los problemas del dispositivo actual de la empresa. Se ha de encontrar un modelo de envolvente que satisfaga los requisitos de diseño exigidos por parte de la empresa y que reúna las características mecánicas necesarias para cumplir estas exigencias.

El diseño final debe ser estanco, proporcionar una zona de emisión adecuada para los emisores, admitir una entrada de alimentación externa y mantenerse a flote de manera estable en las condiciones de funcionamiento, por lo que se ha de estudiar cada uno de los requerimientos y cómo introducirlos en un mismo dispositivo.

Además, y debido al reducido volumen de producción propuesto, se debe encontrar el método de fabricación más adecuado que concuerde con el diseño propuesto y que reduzca por una parte el presupuesto necesario y por otra los errores de fabricación presenciados en la carcasa ya existente.

Índice

| | |
|---------------------------------------------------------------------|-------------|
| Agradecimientos | ix |
| Resumen | xi |
| Objeto | xiii |
| Índice | xv |
| Índice de Tablas | xvii |
| Índice de Figuras | xix |
| 1 Introducción | 1 |
| 1.1 <i>Eutrofización</i> | 1 |
| 1.2 <i>Antecedentes y requisitos</i> | 1 |
| 2 Diseño Conceptual | 3 |
| 2.1 <i>Propuesta 1</i> | 3 |
| 2.2 <i>Propuesta 2</i> | 4 |
| 2.3 <i>Propuesta 3</i> | 6 |
| 2.4 <i>Emisores</i> | 7 |
| 3 Diseño seleccionado | 11 |
| 4 Prototipo | 16 |
| 4.1 <i>Dimensionamiento basado en estabilidad y flotación</i> | 16 |
| 4.2 <i>Estabilidad</i> | 17 |
| 4.3 <i>Emisores</i> | 18 |
| 4.4 <i>Análisis estático de la junta</i> | 20 |
| 5 Análisis del prototipo final | 31 |
| 5.1 <i>Análisis modal</i> | 31 |
| 5.2 <i>Análisis acústico</i> | 31 |
| 5.3 <i>Modelo 1</i> | 39 |
| 5.4 <i>Modelo 2 y 3</i> | 39 |
| 5.5 <i>Modelo 4</i> | 40 |
| 5.6 <i>Modelo 5, 6 y 7</i> | 41 |
| 5.7 <i>Análisis acústico comparativo</i> | 42 |
| 5.7.1 <i>Diferentes adhesivos, cámara de aire y amortiguamiento</i> | 45 |
| 5.8 <i>Estudio del modelo seleccionado</i> | 46 |
| 5.8.1 <i>Flotabilidad y estabilidad</i> | 46 |
| 5.8.2 <i>Nivel de presión</i> | 47 |
| 6 Fabricación | 49 |
| 7 Presupuesto | 53 |
| Conclusiones | 55 |
| Bibliografía | 57 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 2-1. Comparación de las diferentes propuestas | 7 |
| Tabla 3-1. Comparación de procedimientos de fabricación | 11 |
| Tabla 4-1. Iteraciones para la obtener la deformación real en la zona de la junta | 26 |
| Tabla 4-2. Iteraciones para la obtener la deformación real en la zona de la junta con nuevo diseño | 26 |
| Tabla 4-3. Iteraciones con nuevo diseño teniendo en cuenta la superficie de los tornillos y de las tuercas | 28 |
| Tabla 5-1. Comparación del nivel de presión para los distintos modelos | 42 |
| Tabla 5-2. Comparativa de los niveles de presión de los modelos con distintas profundidades de embutición | 43 |
| Tabla 5-3. Atenuación provocada por el adhesivo | 44 |
| Tabla 5-4. Comparación de los diferentes adhesivos | 45 |
| Tabla 7-1. Presupuesto de fabricación | 53 |
| Tabla 7-2. Presupuesto del resto de elementos | 53 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2-1. Propuesta 1. | 3 |
| Figura 2-2. Tapa de la Propuesta 1. | 3 |
| Figura 2-3. Transmisión de calor en la Propuesta 1. Nailon (izquierda), aluminio (derecha). | 4 |
| Figura 2-4. Propuesta 2. | 4 |
| Figura 2-5. Tapa de la Propuesta 2. | 5 |
| Figura 2-6. Transmisión de calor Propuesta 2. Nailon (izquierda), aluminio (derecha). | 5 |
| Figura 2-7. Propuesta 3. | 6 |
| Figura 2-8. Transmisión de calor Propuesta 3. Nailon (izquierda), aluminio (derecha). | 6 |
| Figura 2-9. Propuesta emisores 1. | 7 |
| Figura 3-1. Primer modelo. | 12 |
| Figura 3-2. Zona de la junta (izquierda) y asientos de los emisores (derecha) del primer modelo. | 12 |
| Figura 3-3. Zona para los paneles solares. | 13 |
| Figura 3-4. Alternativa completamente fabricada en chapa. | 13 |
| Figura 3-5. Alternativa en chapa con tapa de plástico. | 13 |
| Figura 3-6. Alternativa de chapa con forma piramidal y tapa de plástico. | 13 |
| Figura 3-7. Alternativa de chapa con forma toroidal y tapa de plástico. | 13 |
| Figura 3-8. Prototipo. | 14 |
| Figura 4-1. Prototipo dimensionado. | 17 |
| Figura 4-2. Junta de estanqueidad y la forma de uso de las juntas cuadrangulares según el catálogo de EPIDOR. | 17 |
| Figura 4-3. Análisis geométrico de estabilidad. | 18 |
| Figura 4-4. Emisor de ultrasonidos. | 19 |
| Figura 4-5. Solución bridada. | 19 |
| Figura 4-6. Prensaestopas. | 20 |
| Figura 4-7. Solución con prensaestopas. | 20 |
| Figura 4-8. Mallado de la tapa y zona de aplicación de la presión. | 21 |
| Figura 4-9. 6 tornillos M4, chapa de 1 mm. | 22 |
| Figura 4-10. 8 tornillos M4, chapa de 1 mm. | 22 |
| Figura 4-11. 6 tornillos M4, chapa de 2 mm. | 23 |
| Figura 4-12. 8 tornillos M4, chapa de 2 mm. | 23 |
| Figura 4-13. 6 tornillos M4, chapa de 3 mm. | 24 |
| Figura 4-14. 8 tornillos M4, chapa de 3 mm. | 24 |
| Figura 4-15. Deformación de la base provocada por la junta. | 25 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4-16. Deformación de la zona de la base en la que se asienta la junta. | 27 |
| Figura 4-17. Deformación de la zona de la junta en la que se asienta la junta. | 27 |
| Figura 4-18. Recomendaciones para compresión inicial de la junta. | 28 |
| Figura 4-19. Deformación en la zona cercana a los orificios. | 29 |
| Figura 5-1. Módulo ‘Harmonic Acoustics’. | 32 |
| Figura 5-2. Emisor diseñado en SOLID EDGE. | 32 |
| Figura 5-3. ‘Enclosure’ del emisor. | 33 |
| Figura 5-4. Sección ‘Model’. | 33 |
| Figura 5-5. Mallado del emisor. | 34 |
| Figura 5-6. Condiciones de contorno y zona de aplicación de la presión en el emisor. | 35 |
| Figura 5-7. ‘SPL’ del emisor. | 35 |
| Figura 5-8. Primer modelo para simulación acústica. | 36 |
| Figura 5-9. Cilindros para simulación del adhesivo. | 36 |
| Figura 5-10. Mallado del primer modelo para simulación acústica. | 37 |
| Figura 5-11. ‘Enclosure’ del primer modelo para simulación acústica. | 37 |
| Figura 5-12. ‘Far Field SPL’ empleado. | 38 |
| Figura 5-13. Resultados obtenidos de la simulación. | 38 |
| Figura 5-14. Modelo 1. | 39 |
| Figura 5-15. Radio del punzón (izquierda) y radio de la matriz (derecha). | 39 |
| Figura 5-16. Modelo 2. | 40 |
| Figura 5-17. Modelo 3. | 40 |
| Figura 5-18. Modelo 4. | 41 |
| Figura 5-19. Modelo 5 (izquierda) y Modelo 6 (derecha). | 41 |
| Figura 5-20. Mallado de los modelos con agujeros no pasantes. | 41 |
| Figura 5-21. Cálculo geométrico de la zona de incidencia de los ultrasonidos de los emisores sobre una esfera de 30 cm de radio para el modelo 5 (izquierda) y modelo 6 (derecha). | 42 |
| Figura 5-22. Modelo 6.1. | 43 |
| Figura 5-23. Modelo 7. | 44 |
| Figura 5-24. Modelo 9. | 44 |
| Figura 5-25. Mallado incluyendo la cámara de aire. | 45 |
| Figura 5-26. Determinación geométrica de la estabilidad en el modelo seleccionado. | 47 |
| Figura 5-27. Posicionamiento de los ‘Far Fiel SPL’ empleados. | 47 |
| Figura 5-28. Atenuación del nivel de presión con la distancia. | 48 |
| Figura 6-1. Forma final del modelo expuesto en el apartado 4. | 50 |

1 INTRODUCCIÓN

El objetivo principal del dispositivo es la emisión de ultrasonidos en el agua para evitar la eutrofización en embalses y balsas de riego, debido a la alta proliferación de bacterias que se produce en estos ambientes y siendo la solución acústica no la más eficaz pero sí una de las más beneficiosas debido a la reducción de agentes químicos necesarios.

1.1 Eutrofización

La eutrofización se produce en masas de agua, normalmente poco profundas, cuando la cantidad de nutrientes disueltos es excesiva y las condiciones climáticas son las adecuadas, provocando el crecimiento y desarrollo de algas que pueden afectar a la calidad del agua y provocar dificultades técnicas.

Este problema afecta sobre todo a regiones áridas donde es necesario el almacenamiento de agua para garantizar el suministro y en las que el clima cálido y el escaso movimiento favorece la aparición de estos organismos.

Actualmente existen diferentes técnicas que solventan este problema, siendo las biológicas y las químicas algunas de las más empleadas, aunque más recientemente han aparecido en el mercado nuevos dispositivos que emplean ultrasonidos para evitar la proliferación de algas en estas condiciones.

Las principales desventajas de los métodos tradicionales son por una parte la ruptura de las células de los organismos provocadas por algunos químicos, que produce la liberación de sus toxinas en el agua, y el alto coste de mantenimiento que supone el uso de otras tecnologías como la aireación o el empleo de mezcladores.

Aunque el empleo de ultrasonidos no resuelve de manera completa el problema, disminuye la cantidad de químicos necesarios y reduce en gran medida el coste de mantenimiento necesario, además, este método no provoca la ruptura de las células de las algas, por lo que se evita la liberación de las sustancias tóxicas en el agua. [13]

1.2 Antecedentes y requisitos

El diseño de carcasa actual está formado por tres partes de material plástico: tapa, flotador y cajetín. El flotador es el objeto de mayor tamaño y mantiene el dispositivo en la superficie del agua al estar relleno de plástico de baja densidad que proporciona la flotabilidad necesaria. La tapa asegura la estanqueidad del flotador, evitando la entrada de agua, polvo y suciedad en el interior del dispositivo. Por último, el cajetín es una pieza de forma cúbica unida al flotador que contiene el equipo electrónico y los emisores, así como la entrada de alimentación y que se encuentra completamente sumergido.

En un primer diseño, el flotador y el cajetín eran piezas separadas unidas mediante dos tornillos. Para evitar la entrada de agua en este segundo objeto, se realizó una hendidura de forma cuadrada en el flotador sobre la que encajaba el cajetín proporcionando un recorrido laberíntico para el agua que intentara entrar, provocando una pérdida de carga suficiente para asegurar la estanqueidad. Sin embargo, al estar expuesto el dispositivo a la radiación solar durante largos periodos de tiempo y al tratarse de un material plástico con coeficiente de conducción térmica reducido, la diferencia de temperatura entre el flotador (caliente) y el cajetín (sumergido y a la temperatura del agua) provocaba deformaciones desiguales en ambos elementos, creando un espacio entre ellos por los que se filtraba el agua, inutilizando el equipo electrónico. Por otra parte, el adhesivo empleado para fijar los emisores en la parte externa del cajetín y para sellar los taladros por los que se introducían los cables de alimentación de los emisores se deterioraba con el paso del tiempo, creando otro punto de entrada de agua.

La empresa decidió realizar variaciones en el diseño para solventar estos problemas. En primer lugar, se

conectó el cajetín con el flotador a través de orificios en la superficie de contacto de ambos elementos para colocar algunos de los componentes electrónicos en la parte superior, alejándolos del agua. Por otra parte, se rodearon los componentes electrónicos con resina para que, en caso de entrada de agua, éstos no resultaran dañados. Sin embargo, las filtraciones se seguían produciendo y el agua llegaba a los elementos a través de las pequeñas fisuras que se producían en la resina con el paso del tiempo.

Otro de los problemas a los que se enfrentaba la empresa era el propio método de fabricación de la carcasa. La fabricación era llevada a cabo por una empresa de inyección de plásticos externa y los productos resultantes a menudo no tenían las dimensiones adecuadas y debían mecanizarse por los propios empleados para poder ser ensamblados, lo que provocaba una grave pérdida de tiempo y un ritmo de fabricación bajo.

Como consecuencia de estos defectos, la satisfacción de los clientes con el producto no era favorable y a menudo el dispositivo era devuelto para su reparación o reemplazamiento, con la consecuente pérdida económica por parte de la empresa.

Por otra parte, ya existen en el mercado dispositivos similares que desempeñan la misma función, por lo que se pueden estudiar algunas de sus características para determinar si son beneficiosas para el dispositivo en estudio.

El principal requisito que debe cumplir la carcasa es la estanqueidad, ya que incorpora sistemas electrónicos sensibles a la humedad y por lo tanto deben estar protegidos del agua que rodea el dispositivo, así como de las inclemencias climatológicas.

Además, es necesario incorporar el sistema de emisores en una posición específica: en contacto con el agua y en un ángulo determinado para optimizar su funcionamiento. Además, se quiere eliminar el material plástico de baja densidad que se emplea para aumentar la flotabilidad, por lo que el dispositivo ha de ser capaz de mantenerse a flote y estable sin aumentar en exceso su tamaño. Por último, el dispositivo debe contar con un sistema de alimentación externa, lo que implica la necesidad de comunicar la carcasa con una fuente de alimentación colocada en tierra.

Desde el punto de vista de la fabricación, es necesario un método que reduzca al máximo las probabilidades de defectos y que elimine, en la medida de lo posible, la manipulación por parte de la empresa a la hora de realizar el montaje de todos los elementos, manteniendo un presupuesto ajustado. Es importante destacar la importancia del coste de fabricación, ya que para un producto de una producción pequeña como es éste, es necesario encontrar un método que minimice el coste fijo necesario (utillaje, matrices, ...).

Por último, la empresa ha estudiado la incorporación de un sistema de placas solares que suministre energía a los componentes para aprovechar la radiación solar que recibe durante gran parte de su funcionamiento, por lo que esta idea será valorada, aunque esta fase se centrará sobre todo en solventar los problemas actuales de la carcasa.

2 DISEÑO CONCEPTUAL

Al tratarse de un producto que va a ser comercializado, el primer planteamiento de las alternativas se desarrolla desde el punto de vista del diseño, es decir, proporcionando alternativas que puedan cumplir los requisitos, pero sin entrar en un estudio en profundidad de sus características. De esta forma, y en colaboración con la empresa, se escogerá el diseño más apropiado y que aúne las demandas de ambas partes. A este efecto se diseñan las propuestas que se describen a continuación.

2.1 Propuesta 1

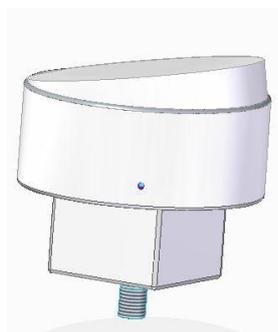


Figura 2-1. Propuesta 1.

Esta primera propuesta plantea un diseño muy similar al ya utilizado por la empresa, sin embargo, se realizaría en dos piezas, cuerpo y tapa, para evitar los problemas de filtración presenciados en el dispositivo ya existente en la zona de unión entre la base cuadrada y el flotador circular. Aunque la conexión de la fuente de alimentación sería un punto crítico de entrada de agua al estar completamente sumergida, este diseño proporciona la opción de colocar de manera sencilla todos los elementos en la parte superior, dejando en el cajetín únicamente los emisores y evitando el contacto con el agua de los elementos más sensibles en caso de fuga. La unión entre el cuerpo y la tapa sería otro punto favorable a la entrada de agua, por lo que ésta se realizaría de manera roscada y contaría con una junta de estanqueidad, asegurando la estanqueidad dentro de la carcasa.

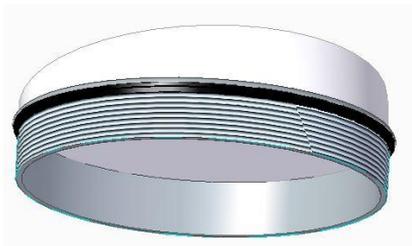


Figura 2-2. Tapa de la Propuesta 1.

La tapa contaría con una inclinación de aproximadamente 20° para mejorar el rendimiento de las placas solares que se instalarán sobre ella.

En cuanto a la elección del material para su fabricación, se realiza una simulación estática en SOLID EDGE de la transmisión de calor que ocurre en la carcasa suponiendo que las caras superiores se encuentran a una temperatura cercana a los 60°C para una carcasa de aluminio y otra de poliamida 66 (nylon). De esta forma se puede determinar de manera aproximada la diferencia de temperatura (y por lo tanto de deformación) que se produce en ambos materiales.

Para ello se realiza un mallado sencillo del modelo que previamente se ha diseñado en el mismo programa. SOLID EDGE proporciona una herramienta de mallado automático en el módulo de simulación en el que sólo hay que introducir la calidad deseada de los elementos. Para este caso, al tratarse de una comparación aproximada y para reducir el tiempo de cálculo, se decide utilizar una malla tetraédrica de calidad intermedia, que, aunque no sería recomendable para cálculos más finos, proporciona los resultados necesarios en este caso. Para aplicar las cargas térmicas y las condiciones de contorno adecuadas, se emplea la sección 'Cargas térmicas', para poder emplearla es necesario seleccionar antes que se trata de un estudio de transmisión de calor estable con la herramienta 'Estudio nuevo'. Se selecciona la cara cilíndrica superior y se aplica una temperatura constante de 60°C . Al tratarse de un programa más enfocado al diseño que a la simulación, las únicas condiciones de contorno que se pueden suponer a parte de la temperatura de una de sus caras son radiación y convección. En este caso, al tratarse de una aproximación, se supondrá sólo la existencia de transmisión de calor mediante convección, para lo que se distingue entre las caras interiores, en contacto con aire a 45°C , y las caras exteriores, en contacto con agua a 25°C , modificando el coeficiente de película aplicado en ambas zonas y suponiendo que la convección libre, siendo por lo tanto el coeficiente de película en la zona de contacto con el aire de $10\text{ W/m}^2\text{K}$ y de $80\text{ W/m}^2\text{K}$.

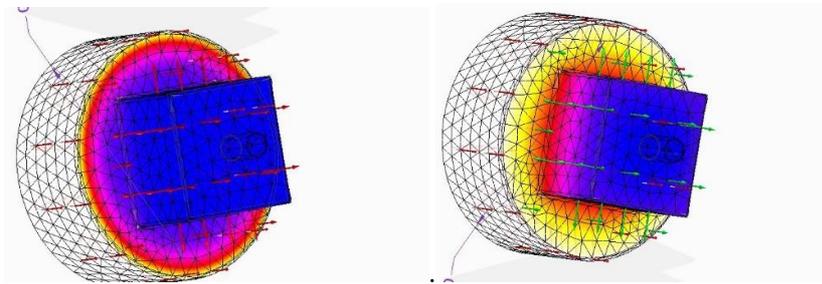


Figura 2-3. Transmisión de calor en la Propuesta 1. Nailon (izquierda), aluminio (derecha).

Como se puede observar, la transición de temperatura se produce bruscamente en el material plástico, sin embargo, en la carcasa metálica, y debido a su mayor coeficiente de conducción, el gradiente de temperatura es menor, reduciendo las posibilidades de deformaciones no uniformes y, por lo tanto, la probabilidad de fallo.

2.2 Propuesta 2

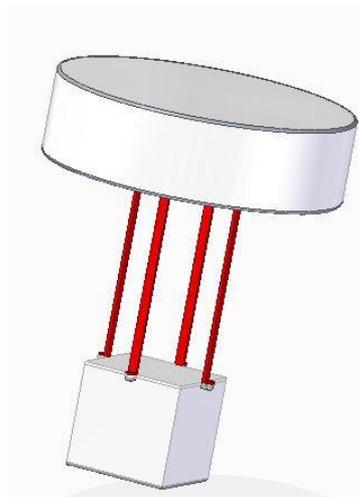


Figura 2-4. Propuesta 2.

Este diseño se asemeja a otros ya existentes en el mercado, consta de dos partes diferenciadas unidas mediante tirantes sin otra función que la estructural. En esta propuesta todos los elementos electrónicos, así como la entrada de la fuente de alimentación estarían colocados en el cajetín cuadrado de la parte inferior, siendo utilizada la parte superior únicamente como flotador. La tapa de la caja estaría sellada mediante una o varias juntas de estanqueidad y atornillada al resto del cajetín para evitar la entrada de agua. En la parte superior los tirantes y el flotador se encontraría unidos mediante un adhesivo para intentar disminuir el número de orificios por los que potencialmente se podría producir una fuga. En la parte inferior, los mismos tornillos que aseguran la estanqueidad entre la tapa y el cajetín servirían para fijar los tirantes a la tapa.



Figura 2-5. Tapa de la Propuesta 2.

Esta alternativa solucionaría los problemas de deformaciones no uniformes, ya que, al estar sumergida la caja, la temperatura en este elemento sería prácticamente la misma en todas las zonas, evitando así deformaciones de diferente magnitud, como se puede comprobar en las siguientes ilustraciones en las que se aprecian los resultados de la simulación siguiendo el mismo procedimiento del caso anterior y en las que se puede apreciar como el mallado automático disminuye en este caso la calidad de los elementos de la parte superior y la aumenta en la zona de los tirantes y el cajetín.

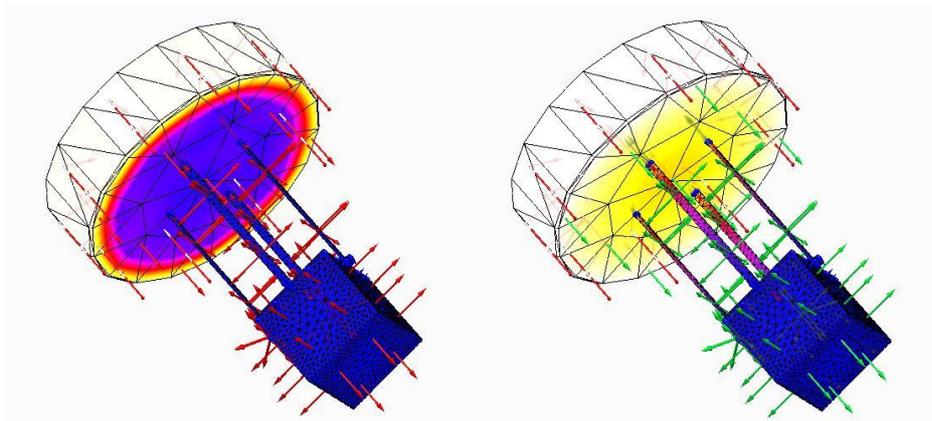


Figura 2-6. Transmisión de calor Propuesta 2. Nylon (izquierda), aluminio (derecha).

Sin embargo, al estar ambas partes completamente separadas, la instalación del panel solar sería compleja, ya que para que la energía llegara desde los paneles hasta la caja con los componentes habría que diseñar algún tipo de conexión. De igual manera sucede con la conexión de alimentación externa, ya que, a diferencia de la primera propuesta, todos los elementos electrónicos deberían encontrarse en el cajetín, lo que supone la inutilización de estos elementos ante cualquier fuga.

Por otra parte, el peso del cajetín y de los elementos electrónicos del interior aportarían mayor estabilidad al sistema al encontrarse el centro de gravedad a una mayor profundidad.

2.3 Propuesta 3

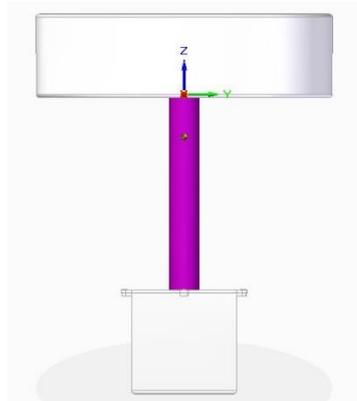


Figura 2-7. Propuesta 3.

Esta propuesta es similar a la expuesta anteriormente, la única diferencia es la unión entre el flotador y la caja, ya que, además de su utilidad estructural, también conecta ambas partes a través del hueco en el interior de la unión. De esta forma, algunos de los elementos electrónicos podrían ser colocados en la parte superior, protegiéndolos contra posibles filtraciones, mientras el resto de los elementos, como los emisores, podrían encontrarse a la profundidad adecuada. Además, se soluciona el problema del panel solar que se ha expuesto en la propuesta 2 y se mantiene la ventaja en materia de estabilidad respecto a la propuesta 1.

Al igual que en el anterior diseño, al encontrarse la caja completamente sumergida, se evitan las deformaciones no uniformes y por lo tanto se previenen las filtraciones. Como se puede apreciar, la calidad de los elementos del mallado varía de la misma forma que en la Propuesta 2.

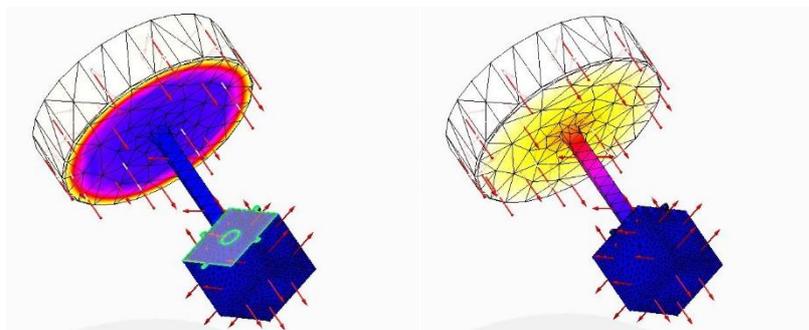


Figura 2-8. Transmisión de calor Propuesta 3. Nailon (izquierda), aluminio (derecha).

Esta propuesta es la más acertada desde el punto de vista funcional, sin embargo, presenta algunas desventajas en cuanto a fabricación, ya que la realización de una pieza única de tales dimensiones requeriría de matrices complejas, en el caso de que se optara por fabricar en plástico, y de moldes intrincados y con machos de gran envergadura en el caso de la fabricación mediante fundición de metales.

Tabla 2-1. Comparación de las diferentes propuestas

| Diseño | Estabilidad | Acceso | Estanqueidad | Panel solar | Temp. Uniforme en el cajetín | Impacto de una fuga | de |
|-------------|-------------|---------|----------------------------------------|-------------|------------------------------|---------------------|---------------------------------|
| Propuesta 1 | Baja | Fácil | Buena (pieza única) | Sí | No | Bajo | (si componentes en el flotador) |
| Propuesta 2 | Alta | Difícil | Prob. de filtraciones (tapa sumergida) | No | Sí | Alto | |
| Propuesta 3 | Alta | Difícil | Prob. de filtraciones (tapa sumergida) | Sí | Sí | Bajo | (si componentes en el flotador) |

2.4 Emisores

También hay que tener en cuenta que los emisores han de trabajar en contacto con el agua, por lo que es necesario encontrar una solución viable para evitar las filtraciones en estos puntos. Una posible solución sería diseñar una salida para el cable de manera similar a la ya existente, pero empleando un sellador adecuado o una brida para asegurar la estanqueidad.

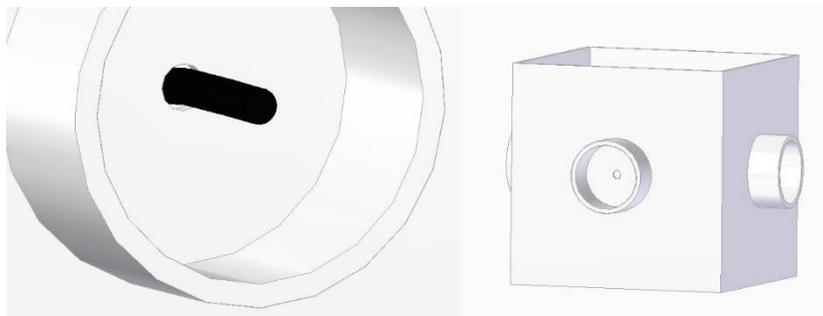


Figura 2-9. Propuesta emisores 1.

Una manera más económica y sencilla de evitar la entrada de agua es la utilización de prensaestopas de una calidad apropiada o incluso el empleo de emisores que no estén en contacto con el agua, sino que se encuentren en el interior de la carcasa, utilizando la propia carcasa como emisora.

Estas dos alternativas serán analizadas posteriormente.

3 DISEÑO SELECCIONADO

Una vez valoradas las ventajas e inconvenientes de cada una de las propuestas, se determina que el diseño más adecuado para cumplir las diferentes exigencias debe ser similar al expuesto en la propuesta 1. Es el diseño más simple desde el punto de vista de la fabricación, y al ser similar al modelo ya existente, se conocen de antemano algunas de sus características en funcionamiento, así como el conjunto de errores más probables que pueden ocurrir.

Se decide entonces diseñar un primer modelo, esta vez ya realizando algunos cálculos preliminares. En primer lugar, se analiza el tipo de material del que debería estar fabricado, como ya se ha expuesto anteriormente, este diseño es el que presenta mayores diferencias de temperatura, lo que podría dar lugar a deformaciones indeseadas. Además, debe ser un elemento resistente a la corrosión, y aunque algunos materiales plásticos proporcionan esta resistencia, el desconocimiento de las características de los ambientes en los que trabajará el dispositivo favorece la elección de un material metálico como elemento para la fabricación. Otro aspecto importante en la determinación del material es el coste de fabricación. Tanto la inyección de plásticos como el conformado de chapa requieren de importantes inversiones iniciales para la realización del utillaje necesario, por lo que en un principio quedan descartados. Las técnicas de impresión 3D de metales y plásticos no requieren de inversiones iniciales, pero al ser procedimientos relativamente novedosos, el coste por pieza es elevado. El método de fabricación de menor coste es la fundición en arena, por lo que en primer lugar se decide estudiar esta alternativa. Por otra parte, para poder mantenerse en la superficie del agua, el dispositivo debe ser lo más ligero posible, por lo que se decide que el material metálico más adecuado para su fabricación es el aluminio, al tratarse de un material muy conocido y empleado en la industria, con una densidad relativamente pequeña y una buena resistencia a la corrosión.

Tabla 3-1. Comparación de procedimientos de fabricación

| Proceso | Coste ¹ | Flexibilidad | Mecanizado | Producción | Material | Tolerancias |
|------------------------|--------------------|--------------|------------|------------|------------------|-------------|
| Inyección de plásticos | Bajo | No | Depende | Media-Alta | Plástico | Buena |
| Fundición | Medio | No | Sí | Cualquiera | Metal | Mala |
| Impresión 3D (SLS) | Alto | Sí | No | Baja | Plástico o Metal | Aceptable |

Para la alimentación se sustituye la entrada del cable sumergida del modelo ya existente por una entrada que se sitúa por encima de la línea de flotación, previniendo así problemas de filtraciones. Sin embargo, de esta manera se pierde parte de la estabilidad proporcionada por la conexión en la parte inferior, por lo que se opta por colocar dos entradas de manera simétrica, disminuyendo en la medida de lo posible la pérdida de estabilidad.

Para mejorar el rendimiento de los emisores, éstos deben estar en ángulo de aproximadamente 9° respecto a la superficie del agua, por lo que se determina que es necesario cambiar la caja plana con paredes verticales de la propuesta 1, por una caja en forma de semiesfera, en cuyo radio de acuerdo con el flotador forme un pequeño ángulo en el que se colocan los emisores, como se muestra en la Figura 3-1. Esta alternativa provoca algunas dificultades desde el punto de vista de la fabricación, siendo completamente necesarias operaciones de mecanizado una vez fabricado el dispositivo para crear las zonas en las que se colocarán los emisores y por lo

¹ El coste puede variar dependiendo de la producción, ya que, en producciones altas, un coste de inversión inicial elevado puede ser asumible.

tanto siendo necesario un utillaje específico, lo que encarece el precio. Aunque este procedimiento es muy versátil y se puede adaptar a distintos niveles de producción, la fabricación mediante fundición en arena requiere de espesores grandes, de al menos 3 mm, lo que aumenta considerablemente el peso del dispositivo, reduciendo la capacidad de flotación, por lo que para que éste sea estable es necesario un gran tamaño del dispositivo.



Figura 3-1. Primer modelo.

En cuanto a la estanqueidad de la unión entre la tapa y la base, se opta por colocar una junta de estanqueidad entre ambas partes lo más cerca posible de los tornillos que aseguran el apriete necesario. Además, de forma similar a la solución adoptada por la empresa en su primer modelo, se decide realizar un escalón entre la junta y el interior del dispositivo, indicada en la Figura 3-2, para asegurar la estanqueidad incluso si el agua consigue traspasar la junta.

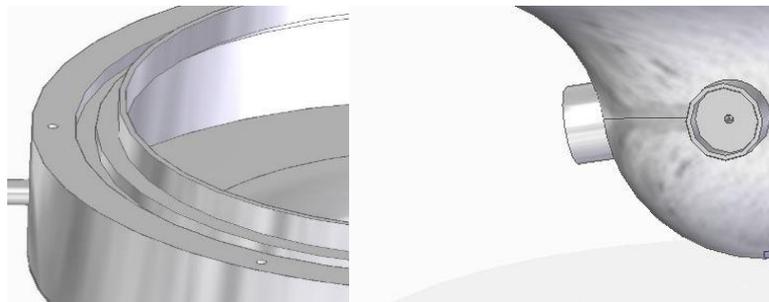


Figura 3-2. Zona de la junta (izquierda) y asientos de los emisores (derecha) del primer modelo.

Para la tapa, y siguiendo los requerimientos de la empresa, se colocan 6 paneles solares para aportar la energía necesaria al sistema, se elige una forma de pirámide hexagonal truncada en su punta para que los paneles se encuentren en el ángulo adecuado y así recibir la mayor energía solar posible. Aunque son necesarios dos taladros en la tapa por panel, la empresa que suministra estos elementos asegura que el propio recubrimiento que se emplea tras la colocación de los paneles para su correcto funcionamiento proporciona la estanqueidad suficiente como para que no sean necesarios otros elementos en este ámbito.

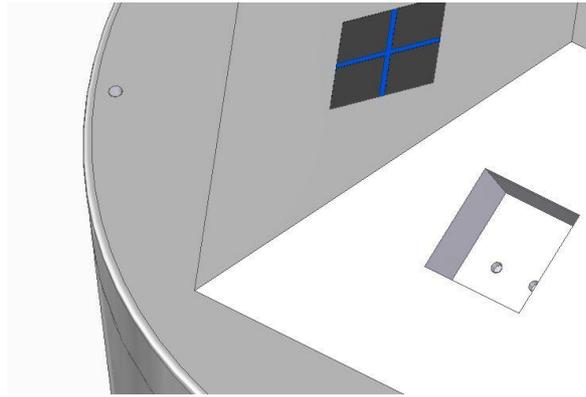


Figura 3-3. Zona para los paneles solares.

Como ya se ha comentado, la necesidad de un espesor mínimo y de un mecanizado posterior, afectan de forma considerable a la viabilidad de esta alternativa debido tanto a razones de estabilidad y tamaño, como de presupuesto.

De esta manera, se descarta el procedimiento de fundición, y se estudia la fabricación mediante conformado de chapa, ya que con este proceso se podrían generar espesores pequeños de aproximadamente 1 mm que otorgarían la resistencia necesaria sin suponer un peso demasiado elevado. Sin embargo, para no incrementar el presupuesto en la fabricación, debido a que las matrices necesarias para este procedimiento son costosas, se simplifica el diseño inicial, dando lugar de nuevo a varias alternativas para el diseño que se muestran en las siguientes figuras. Además, también se estudia la posibilidad de combinar distintos materiales para abaratar el proceso y mejorar algunas propiedades como el peso.

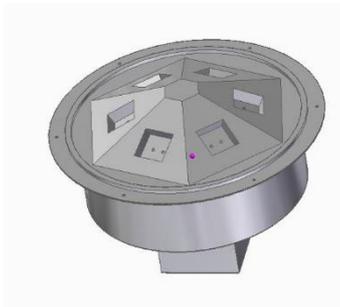


Figura 3-4. Alternativa completamente fabricada en chapa.

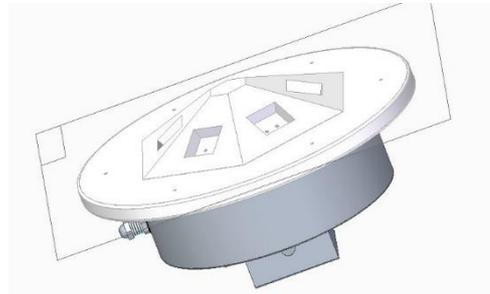


Figura 3-5. Alternativa en chapa con tapa de plástico.



Figura 3-7. Alternativa de chapa con forma toroidal y tapa de plástico.

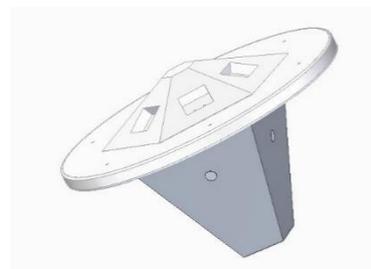


Figura 3-6. Alternativa de chapa con forma piramidal y tapa de plástico.

En estos modelos se observan las diferentes posibilidades, entre las que se encuentran algunos diseños con formas completamente diferentes a las anteriormente expuestas, resultado de algunas ideas surgidas en colaboración con la empresa. Sin embargo, de entre ellas, la alternativa escogida es la expuesta en la Figura 3-4, un modelo que continua con las ideas de diseño expuestas con anterioridad. El resto de las propuestas son descartadas por su dificultad en la fabricación y por la combinación de materiales, ya que, aunque es una buena solución para mejorar algunas características, se quiere evitar en la medida de lo posible la posibilidad de fallos debidos a las diferencias en sus coeficientes de dilatación como ya sucede en el modelo actual. En último lugar, otro de los aspectos a considerar es la funcionalidad y al ser este diseño parecido al ya utilizado, esta está probada.

Por otra parte, el hecho de crear una tapa metálica con la forma adecuada para los paneles solares supone varios problemas tanto de diseño como de fabricación, por lo que el estudio de esta parte es pospuesto para las siguientes fases del diseño para poder centrarse en los problemas más acuciantes que necesitan ser resueltos.

Con esta nueva alternativa, se decide diseñar un prototipo que cumpla el resto de requisitos y sobre el cual se pueda empezar a trabajar.

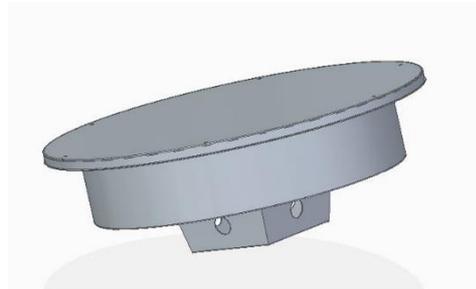


Figura 3-8. Prototipo.

4 PROTOTIPO

Una vez escogido el nuevo diseño, se decide el estudio intensivo de un prototipo que reúna todas las características necesarias. En este apartado se incluyen las soluciones de diseño adoptadas, así como un presupuesto aproximado de su fabricación.

4.1 Dimensionamiento basado en estabilidad y flotación

Al tratarse de un problema abierto, cuyo estudio puede comenzar por la investigación de varias áreas, se decide que, para tener un punto de partida sólido, y al ser el peso de los componentes de las pocas variables que están definidas, una de las primeras características a considerar es la capacidad de flotación y por lo tanto es necesario definir el tamaño necesario de la carcasa.

Para dimensionar el dispositivo, se realizan los cálculos teniendo en cuenta el peso de la carcasa y de los elementos electrónicos y el empuje de Arquímedes producido por el volumen del dispositivo que se encuentra sumergido. Para realizar los cálculos de manera que asegure la flotación del elemento, se emplea un coeficiente de mayoración del peso de valor 1.7.

$$C \times \text{Peso} = \text{Volumen sumergido} \times \rho_{\text{agua}} \quad (4-1)$$

$$\text{Peso} = \text{Peso}_{\text{tapa}}(D) + \text{Peso}_{\text{base}}(D, H) + \text{Peso}_{\text{componentes}} = f(D, H) \quad (4-2)$$

Siendo D, el diámetro de la parte circular (flotador) y H la altura de este elemento.

Para calcular tanto el peso de la tapa como el de la base, se emplea una chapa de 1 mm de espesor de aluminio de densidad 2700 kg/m^3 . El peso de los componentes es proporcionado por la empresa, siendo éste de 320 g.

Se impone que las dimensiones de la caja en la que están colocados los emisores sean de 10x10x5 cm, y que la altura de 'flotador' sea de H= 8 cm, manteniendo aproximadamente las mismas dimensiones de la carcasa ya empleada. De esta forma, en la ecuación sólo hay dos variables, el diámetro del flotador, y la profundidad a la que está sumergido todo el dispositivo. Imponiendo una profundidad de 7 cm, es decir, que el agua cubra 2 de los 8 cm del flotador, se obtiene un diámetro de D = 32 cm.

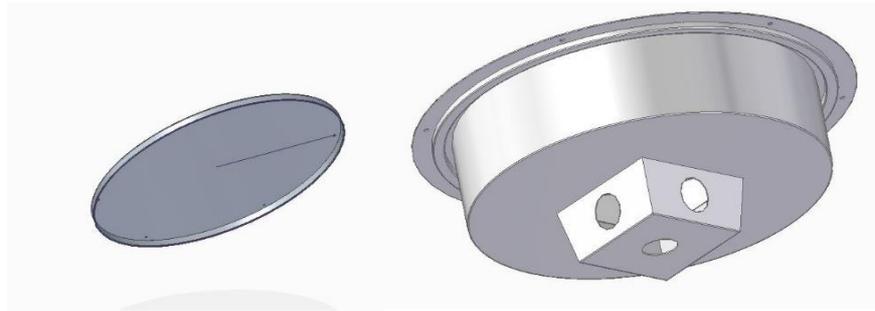


Figura 4-1. Prototipo dimensionado.

Como solución para la estanqueidad entre la tapa y la base se decide el empleo de una junta colocada de forma machihembrada deformada mediante el empleo de tornillos. Se estudia el uso de diferentes tipos de juntas siendo las más adecuadas para esta función las de tipo cuadrangular del catálogo de EPIDOR. Estas juntas de sección en 'X' proporcionan una mejor estanqueidad debido a que cuentan dos aristas de sellado y por lo tanto se disminuye el riesgo de filtraciones. Sin embargo, estas juntas están destinadas a un uso industrial en el que las exigencias son mucho mayores de las necesarias en este caso, por lo que, debido a su coste elevado, se decide estudiar otras alternativas. Para ello se contacta con la empresa JUNTEC, y se decide que la mejor opción es el empleo de una junta de EPDM de sección cuadrada que se colocará de la misma forma que en el caso anterior. Las características de esta junta son inferiores que la expuesta anteriormente, sin embargo, debido a la disminución del coste y al trabajar en situaciones poco exigentes, se decide que es la más adecuada para esta función. El análisis de esta unión se realizará en el apartado 5.4 Análisis estático de la junta.

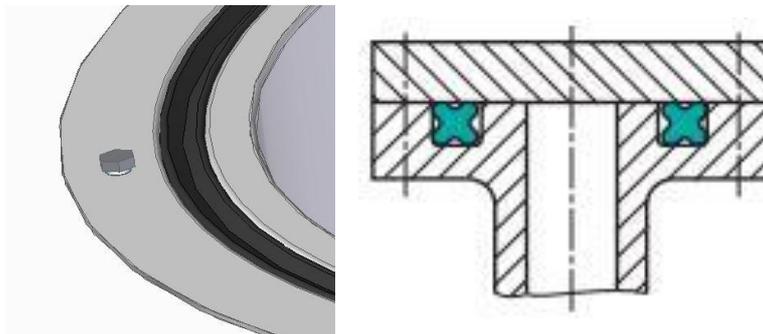


Figura 4-2. Junta de estanqueidad y la forma de uso de las juntas cuadrangulares según el catálogo de EPIDOR. [10]

Aunque se entrará a estudiar más adelante las soluciones para la conexión de alimentación y los emisores, en esta primera aproximación se decide que éstos se coloquen de forma similar al dispositivo empleado, es decir, con los emisores colocados en las paredes laterales del cajetín y la alimentación externa en la parte inferior de este.

4.2 Estabilidad

Otro de los aspectos fundamentales en el funcionamiento a parte de la flotabilidad es la estabilidad de la carcasa sobre la superficie del agua.

Aunque en un principio se supone que el diseño es estable gracias a que la conexión de alimentación estabiliza la carcasa y a que un diseño muy similar ya ha sido probado con éxito, se decide realizar un estudio analítico de su comportamiento.

El cálculo se efectúa a partir de un método geométrico para el que se han de determinar los centros de gravedad y de volumen del dispositivo en el sistema completo y en el volumen sumergido. De esta forma se

determina el punto en el que se aplica el peso y el punto en el que se aplican las fuerzas de empuje, denominado centro de flotación (B). Para conseguir un sistema estable se necesita conseguir un momento producido por ambas fuerzas que devuelva al dispositivo a su posición inicial si éste se inclina.

Para calcular este momento, denominado momento de adrizamiento, es necesario conocer el centro de flotación del sistema cuando éste está escorado. Para ello se supone una inclinación de 5° y se calcula el centro de volumen en el volumen sumergido. El elemento será estable si la intersección entre la línea vertical que pasa por el centro de flotación en la posición de equilibrio y la línea perpendicular a la línea de flotación que pasa por el centro de flotación para la posición en la que el dispositivo se encuentra inclinado 5° se produce por encima del centro de gravedad. De esta forma, el peso y el empuje generarán un momento estabilizador, que será mayor cuanto mayor sea la distancia horizontal entre ambas líneas en el centro de gravedad, denominado brazo de adrizamiento. [7]

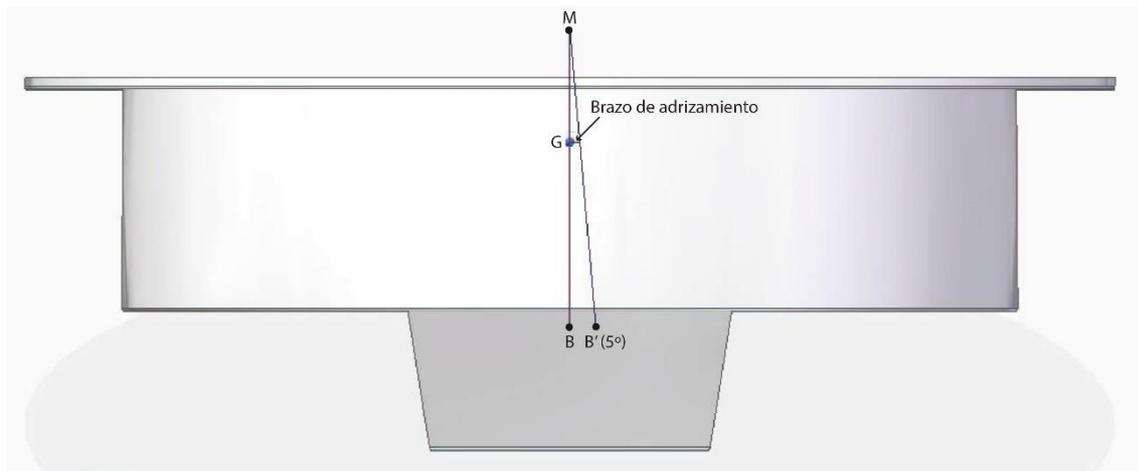


Figura 4-3. Análisis geométrico de estabilidad.

Como se puede apreciar en la imagen, el brazo de adrizamiento es positivo por lo que el dispositivo será estable incluso sin la influencia de la conexión de alimentación como elemento estabilizador.

4.3 Emisores

El objetivo fundamental del dispositivo es la emisión de ultrasonidos a través del agua para solventar los problemas de eutrofización. Para ello se cuenta con unos emisores de pequeño tamaño con envoltura de aluminio, diseñados para estar en contacto directo con el agua, por lo que es necesario conectar los emisores con el interior a través de la pared de la carcasa. La solución adoptada por la empresa en el dispositivo ya existente es el empleo de un adhesivo que une los elementos y asegura la estanqueidad dentro de la carcasa, sin embargo, se siguen produciendo filtraciones en esta zona debido, entre otras razones, a que no se produce una adhesión química entre el adhesivo y el resto de los elementos, y éste se acaba deteriorando y despegando, provocando la entrada del agua.

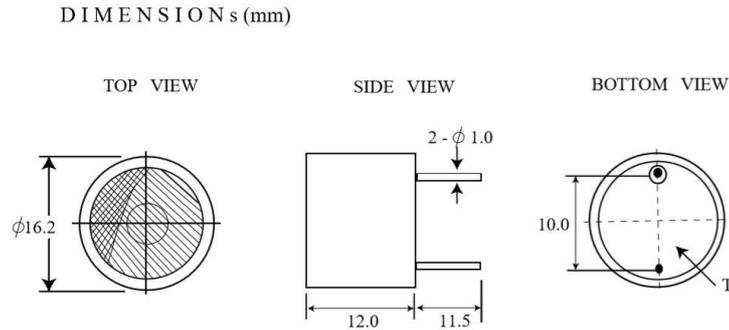


Figura 4-4. Emisor de ultrasonidos.

En una primera aproximación al problema se investiga el uso de un adhesivo más apropiado, pero debido a la escasa información sobre la composición del agua en el ambiente de funcionamiento del dispositivo, y a la posibilidad de que éste fuera diferente en las distintas localizaciones se decide que la solución más adecuada es el empleo de algún sistema con apriete que asegure la estanqueidad de manera mecánica. A este efecto se proponen dos alternativas: el uso de una unión bridada y el empleo de prensaestopas.

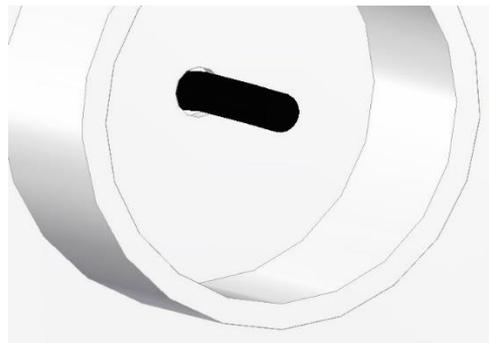


Figura 4-5. Solución bridada.

La unión bridada, formada por una junta y una brida que la deforma para evitar la entrada de agua, es una solución muy empleada en ingeniería y que aseguraría de manera efectiva la estanqueidad. Sin embargo, requeriría de un pequeño saliente (Figura 4-5), y desde el punto de vista de la fabricación mediante conformado de chapa, sería complicado realizar este elemento, por lo que esta solución queda descartada.

La otra opción es el empleo de prensaestopas a modo de 'pasamuros'. Aunque estos elementos no están diseñados específicamente para este propósito, presentan una amplia gama de formas, tamaños y características que los hacen indicados para este uso. El modelo de prensaestopas que se requiere en este caso necesita disponer de un componente, además del propio prensaestopas, para evitar la entrada de agua entre esta pieza y la carcasa. Además, al existir diferentes tipos de calidades en estos elementos, es necesario encontrar la más adecuada para esta función. Los prensaestopas se clasifican en una escala IP según su resistencia a la entrada de agua y de polvo. Para este caso es necesario una categoría IP6 o superior en cuanto a la entrada de agua para evitar filtraciones. El prensaestopas seleccionado presenta una calidad IP68 y es distribuido por la empresa 'delValle', está fabricado en poliamida 66, material que presenta una buena resistencia a la corrosión, y su rango de sujeción se encuentra entre 16 y 21 mm de diámetro, apropiado para los 16.2 mm de diámetro de los emisores. Además, incluye el mecanismo mencionado para evitar fugas en la unión entre el prensaestopas y la carcasa.



Figura 4-6. Prensaestopas.

A parte de para los emisores, este modelo de prensaestopas se empleará también en la conexión con la fuente de alimentación externa situada en la parte inferior del dispositivo.

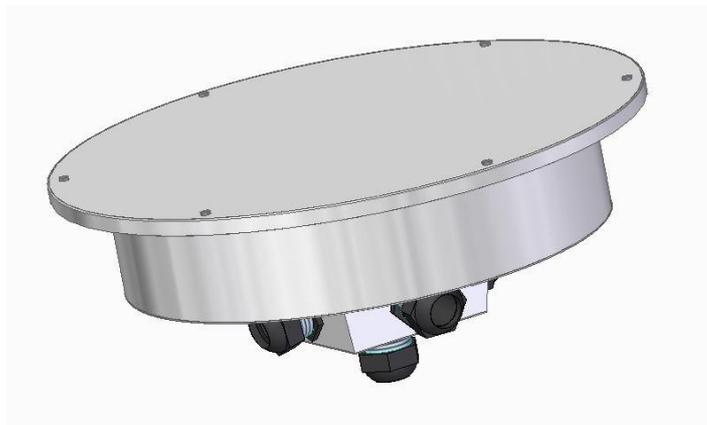


Figura 4-7. Solución con prensaestopas.

4.4 Análisis estático de la junta

Por otra parte, es necesario conocer las deformaciones que se producen debido a la presión ejercida por la junta, ya que, si esta es excesiva, su funcionamiento no sería el adecuado y podría dar lugar a fugas.

En primer lugar, para determinar el número de tornillos que deben colocarse en la tapa del dispositivo, se calcula la fuerza ejercida por la junta sobre la tapa, y mediante la ecuación (5-3) se obtiene el número de tornillos necesarios.

Aunque en un principio se decide emplear una junta de NBR de sección en ‘X’ de la marca EPIDOR, esta idea es desechada debido a que los requerimientos de estanqueidad necesarios no justifican su elevado precio, por lo que se opta por una junta de EPDM de sección cuadrada de la marca JUNTEC de 3 mm de espesor. Este material posee un módulo de elasticidad de 5 MPa y se establece que la deformación que se debe aplicar es de 1 mm. De esta forma, la presión ejercida sobre la tapa sería de 1.6 MPa. Teniendo en cuenta que el diámetro interior de la junta es de 336.5 mm y que su espesor es de 3 mm, la fuerza resultante es de 2548.46 N.

Para calcular la fuerza ejercida por los tornillos se empleó la fórmula: [4]

$$F_t = 0.9 \cdot f_{ub} \cdot \frac{A_s}{\gamma_{Mb}} \cdot n^{\circ} \text{ tornillos} \quad (4-3)$$

Donde A_s representa la sección resistente de la parte roscada, f_{ub} es la tensión última del acero de los tornillos y γ_{Mb} es un coeficiente de seguridad cuyo valor se suele suponer 1.25 en tornillos.

Para el cálculo se ha supuesto el empleo de 6 tornillos de acero de métrica M4, cuya área resistente es de 8.78 mm^2 y su tensión última de 240 N/mm^2 . De esta forma, se obtiene una fuerza de 9103.1 N , suficiente para asegurar la unión entre ambos elementos.

Por otra parte, se consulta la guía proporcionada por el Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales 'NTP 364: Prevención de Fugas en Instalaciones', 1992. Aunque la información proporcionada por este documento está referida a uniones bridadas en tuberías con juntas planas, las similitudes con el caso en estudio son suficientes para tener en consideración esta información. Según esta guía, para uniones con un diámetro similar al empleado en este caso, el número mínimo de tornillos a emplear es de 8.

Aunque como se acaba de mencionar, el número de tornillos más adecuado es 8, se realiza un análisis estructural estático en ANSYS para confirmarlo. Para la obtención de los primeros resultados se utiliza el programa ANSYS APDL, empleando para el mallado elementos tetraédricos de manera uniforme. La simulación se realiza empleando distintos tamaños de elementos para conseguir la convergencia de las mallas, obteniendo que entre el rango de tamaño de elementos comprendido entre 0.005 m y 0.003 m la diferencia de resultados es tal que se puede suponer que los resultados son aceptables si se utilizan elementos de este tamaño. [3]

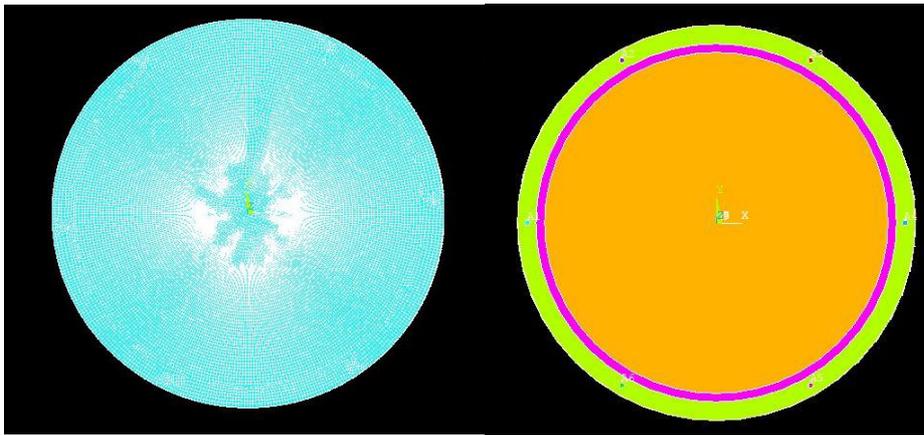


Figura 4-8. Mallado de la tapa y zona de aplicación de la presión.

En primer lugar, se modela una tapa de 1 mm de espesor con 6 tornillos y se aplica la presión ejercida por la junta suponiendo que esta se deforma 1 mm para determinar la deformación producida en la zona de contacto y de esta forma obtener la deformación real producida en la junta.

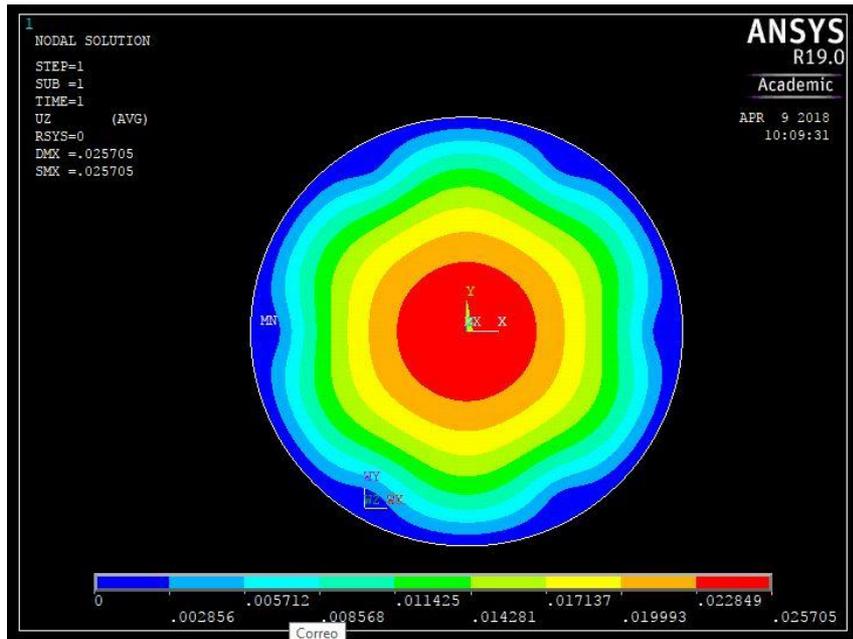


Figura 4-9. 6 tornillos M4, chapa de 1 mm.

De la simulación realizada se puede extraer que las deformaciones entre los tornillos en la zona de la junta son de más de 5 mm, por lo que es evidente que esta solución no es la acertada.

A continuación, se muestra el resultado de realizar el mismo procedimiento, pero esta vez empleando 8 en lugar de 6 tornillos.

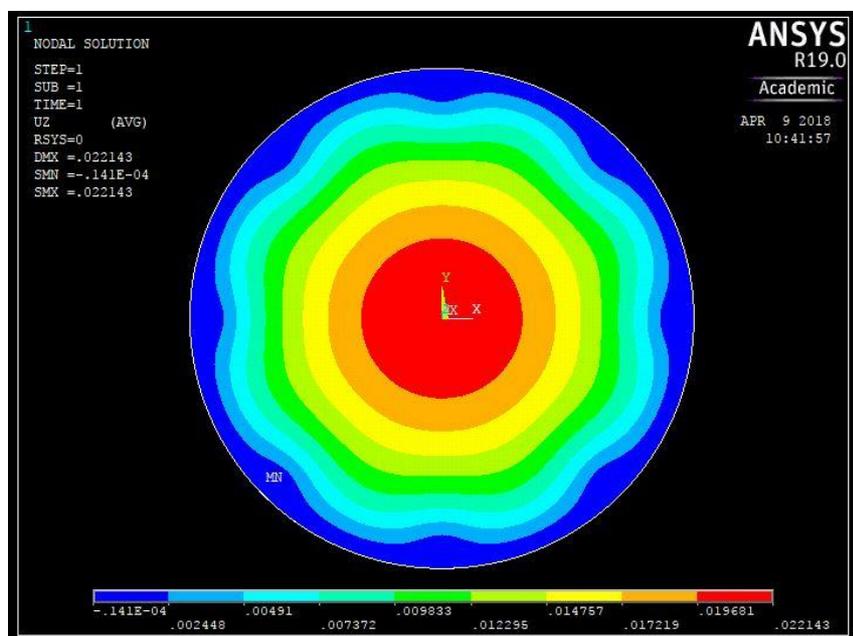


Figura 4-10. 8 tornillos M4, chapa de 1 mm.

De esta simulación se obtiene que, aunque el tamaño de la deformación ha disminuido, sigue superando en algunas zonas los 4 mm.

En lugar de seguir aumentando el número de tornillos, se decide que otra posible opción era incrementar el espesor de la tapa para reducir la deformación. En las siguientes imágenes se pueden observar los resultados de

las simulaciones con una tapa de 2 mm de espesor para 6 y 8 tornillos.

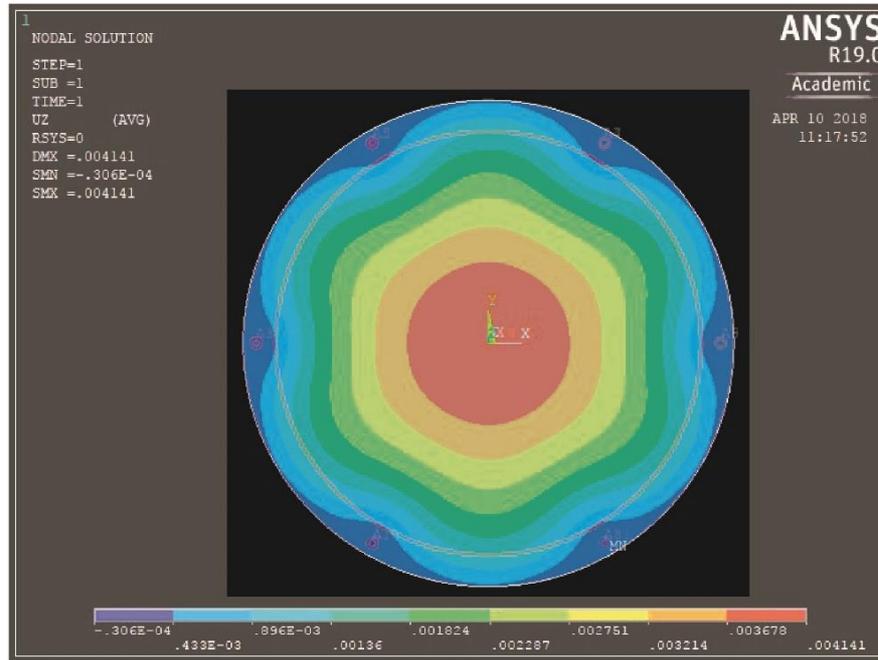


Figura 4-11. 6 tornillos M4, chapa de 2 mm.

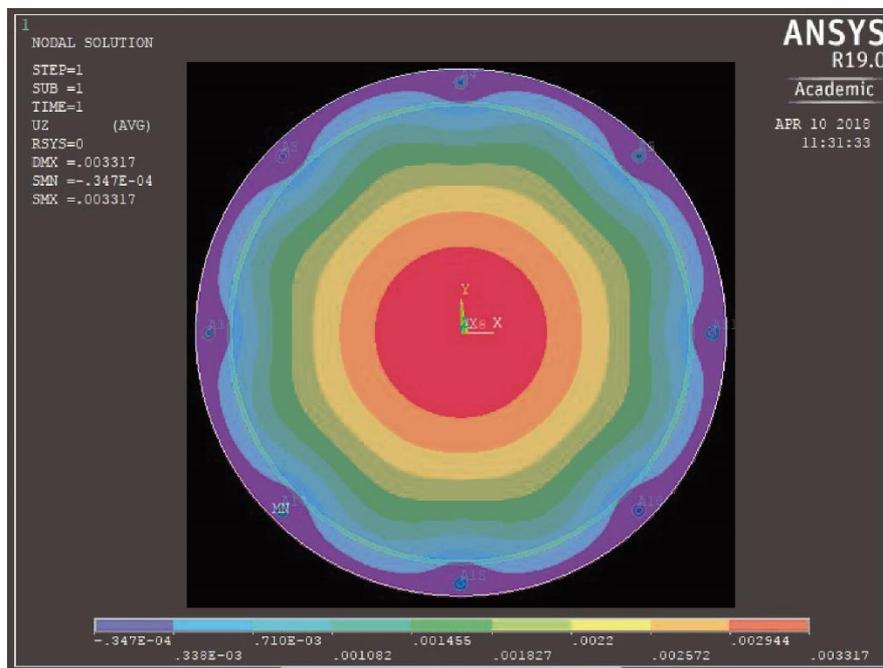


Figura 4-12. 8 tornillos M4, chapa de 2 mm.

En estas imágenes además del resultado de la simulación se ha superpuesto la imagen de la zona en la que se encuentra la junta para apreciar con mayor claridad la deformación en esta zona. En ambas imágenes se aprecia una gran reducción de las deformaciones, siendo éstas de aproximadamente 1 mm con 6 tornillos y de 0.71 mm en la tapa de 8 tornillos, sin embargo, sigue sin ser un resultado aceptable ya que hemos supuesto una deformación de la junta de 1 mm, por lo que, si la tapa se deforma en esa zona con los valores anteriores, puede existir la posibilidad de filtraciones. Siguiendo con el mismo procedimiento, se ha supuesto un espesor

de la tapa de 3 mm.

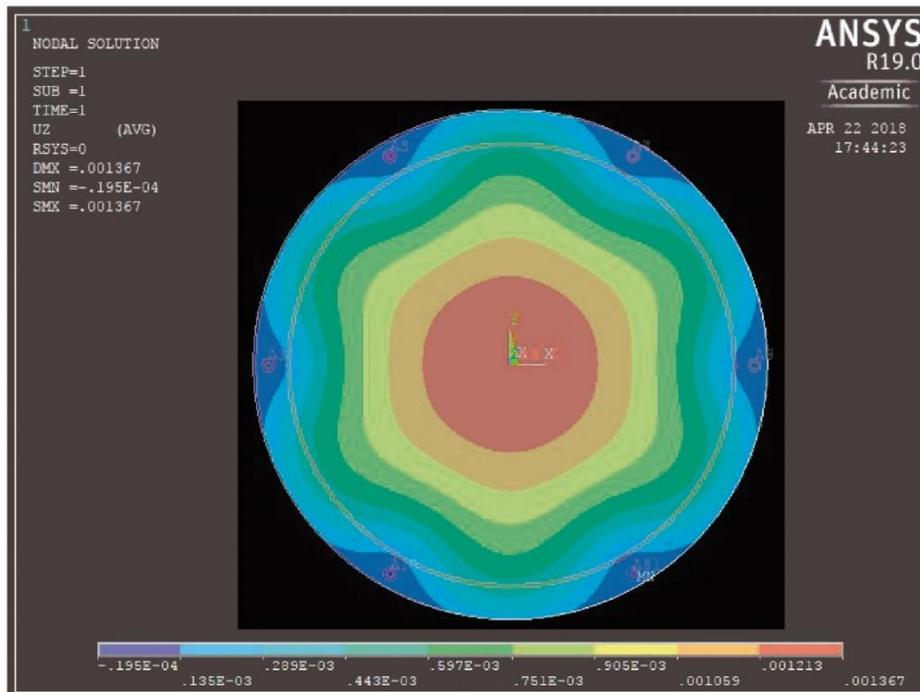


Figura 4-13. 6 tornillos M4, chapa de 3 mm.

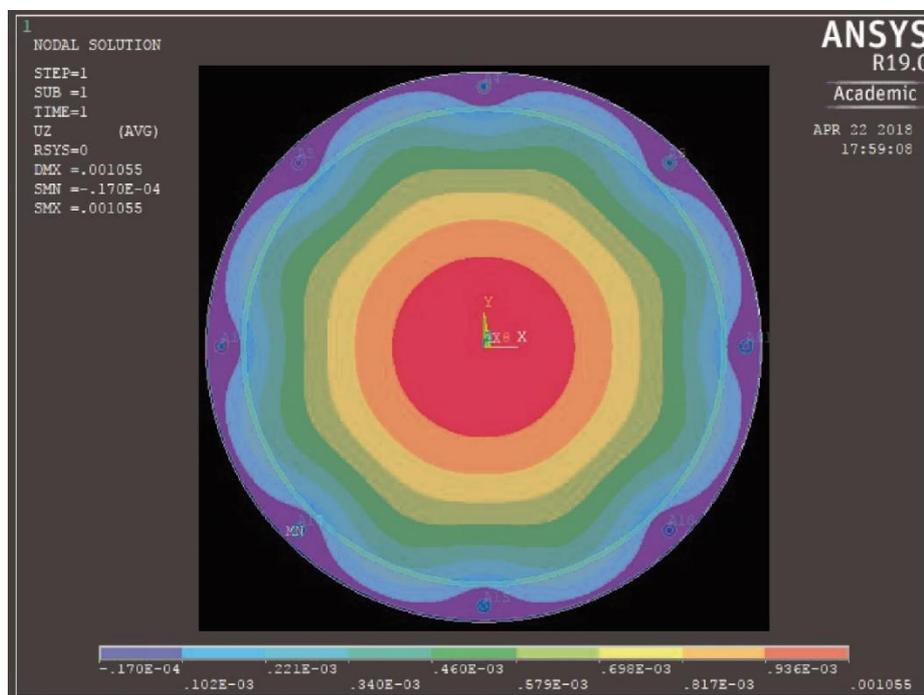


Figura 4-14. 8 tornillos M4, chapa de 3 mm.

La disminución de la deformación máxima es notable, siendo esta de 0.29 mm en el caso de los 6 tornillos y de 0.2 mm en el caso de los 8 tornillos. Aunque ambos resultados son aceptables, se ha optado por el empleo 8 tornillos debido a la menor deformación que se produce y a la mayor seguridad que proporciona ante el fallo de alguna de las uniones.

Este mismo procedimiento se ha llevado a cabo en la zona de la base en la que se asentará la junta. Al igual que en el caso anterior, se han restringido los desplazamientos en los agujeros y se ha aplicado la misma presión que en el caso anterior, obteniendo los resultados que aparecen en la siguiente figura. Para obtener los resultados con mayor precisión en la zona deseada, y debido a las limitaciones numéricas del programa académico, se ha utilizado una malla gruesa en las zonas de poco interés y ésta se ha afinado en la zona en la que irá colocada la junta. Además, debido a la forma relativamente compleja de la base, se decide continuar las simulaciones con el programa ANSYS WORKBENCH, ya que ofrece una mayor facilidad a la hora de trabajar con figuras en tres dimensiones. Para ello se emplea el módulo de ‘Static Structural’ y se introduce el diseño realizado en SOLID EDGE. Al igual que en el caso anterior, se aplica la presión en la zona de contacto con la junta y se restringen todos los movimientos en los orificios de los tornillos.

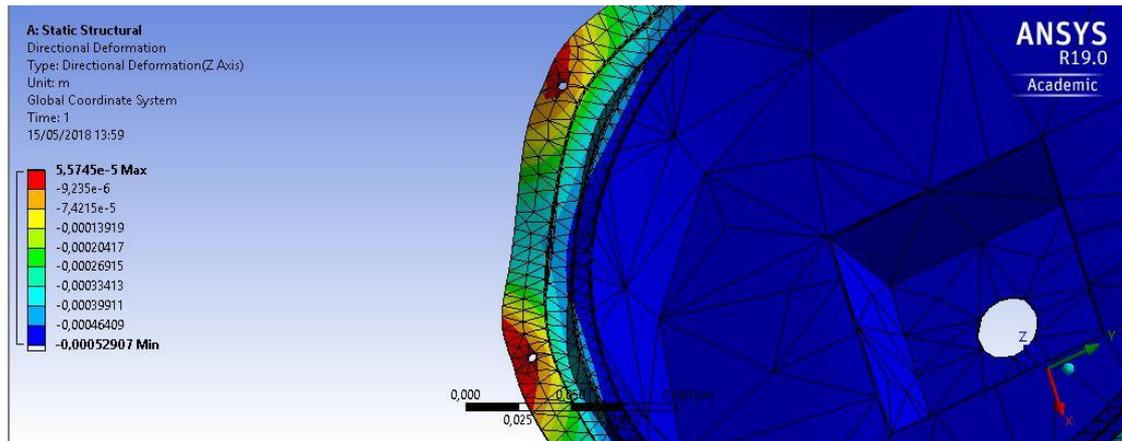


Figura 4-15. Deformación de la base provocada por la junta.

El máximo desplazamiento que se produce en la dirección opuesta a la del eje ‘z’ es de poco más de medio milímetro. Teniendo en cuenta que la deformación provocada en la junta es de un 1 mm y que sumando ambas deformaciones (de la tapa y de la base) la deflexión sería de más de 0.7 mm, se podría suponer que la solución no es apropiada, sin embargo, hay que tener en cuenta que en ninguno de los dos casos se ha supuesto que la presión ejercida por la junta disminuye cuando ambas partes se separan, y además, las mayores deformaciones se producen de manera puntual. Por otra parte, hay que tener en cuenta que los requerimientos de esta junta no son muy altos, debe asegurar la estanqueidad a una presión ambiente y sólo entraría en contacto con el agua en caso de que el dispositivo se escorara en exceso o se hundiera, ambos casos improbables en una balsa de riego que sólo tendrían lugar en caso de que el dispositivo fallase.

Sin embargo, y para tener en cuenta el comportamiento mecánico de la junta, se ha realizado un proceso iterativo para encontrar la deformación que se produce de manera más aproximada a la real. Para ello se emplea como punto de partida la deformación media en la zona de contacto con la junta de ambas partes calculada con la presión inicial para calcular la nueva presión que se ejerce. Realizando este procedimiento hasta que la solución converja se obtiene la deformación real producida por la junta. A continuación, se exponen los resultados obtenidos de las iteraciones:

Tabla 4-1. Iteraciones para la obtener la deformación real en la zona de la junta

| Iteración | Deformación media en la base | Deformación media en la Tapa |
|-----------|------------------------------|------------------------------|
| 1 | -4.07e-4 m | 1.22e-4 m |
| 2 | -1.9e-4 m | 5.74e-5 m |
| 3 | -3.05e-4 m | 9.14e-5 m |
| 4 | -2.46e-4 m | 7.36e-5 m |
| 5 | -2.77e-4 m | 8.3e-5 m |
| 6 | -2.6e-4 m | 7.8e-5 m |
| 7 | -2.69e-4 m | 8.07e-5 m |
| 8 | -2.65e-4 m | 7.93e-5 m |
| 9 | -2.67e-4 m | 7.99e-5 m |

Como se puede apreciar, se considera que en la novena iteración la solución ha convergido por lo que se obtiene que la deformación media producida en la dirección del eje 'z' es de -0.267 mm en la base y de 0.0799 mm en la tapa, con lo que la junta se encontrará deformada de media 0.65 mm y la presión que ejercerá será de 1.0885 MPa. Además, la deformación máxima producida en ambas partes produce una deformación de la junta de 0.484 mm, por lo que la presión mínima generada es de 0.8 MPa.

Aunque se considera que la presiones y deformaciones generadas son suficientes para los requerimientos necesarios, se realiza otro proceso análogo, pero variando el diseño de la parte superior. En este diseño se han acercado tanto la junta como los tornillos al resto del dispositivo para apreciar los cambios en las deformaciones que se producirían.

Tabla 4-2. Iteraciones para la obtener la deformación real en la zona de la junta con nuevo diseño

| Iteración | Deformación media en la base | Deformación media en la Tapa |
|-----------|------------------------------|------------------------------|
| 1 | -3.7545e-4 m | 1.03e-4 m |
| 2 | -2.018e-4 m | 5.5269e-5 m |
| 3 | -2.9051e-4 m | 7.9561e-5 m |
| 4 | -2.4639e-4 m | 6.7479e-5 m |
| 5 | -2.6835e-4 m | 7.3495e-5 m |
| 6 | -2.5739e-4 m | 7.0493e-5 m |
| 7 | -2.6286e-4 m | 7.1991e-5 m |
| 8 | -2.6016e-4 m | 7.1252e-5 m |
| 9 | -2.6148e-4 m | 7.16155e-5 m |
| 10 | -2.608e-4 m | 7.1432e-5 m |
| 11 | -2.6115e-4 m | 7.1522e-5 m |

Se observa que las deformaciones producidas son ligeramente inferiores, con un valor medio de 0.667 mm, y por lo tanto con una presión media superior a la anterior, con un valor de 1.112 MPa. Lo mismo ocurre en el caso de la deformación mínima que en este caso es de 0.52 mm, por lo que la presión mínima producida será de 0.86 MPa, 0.06 MPa superior a la producida con el diseño anterior.

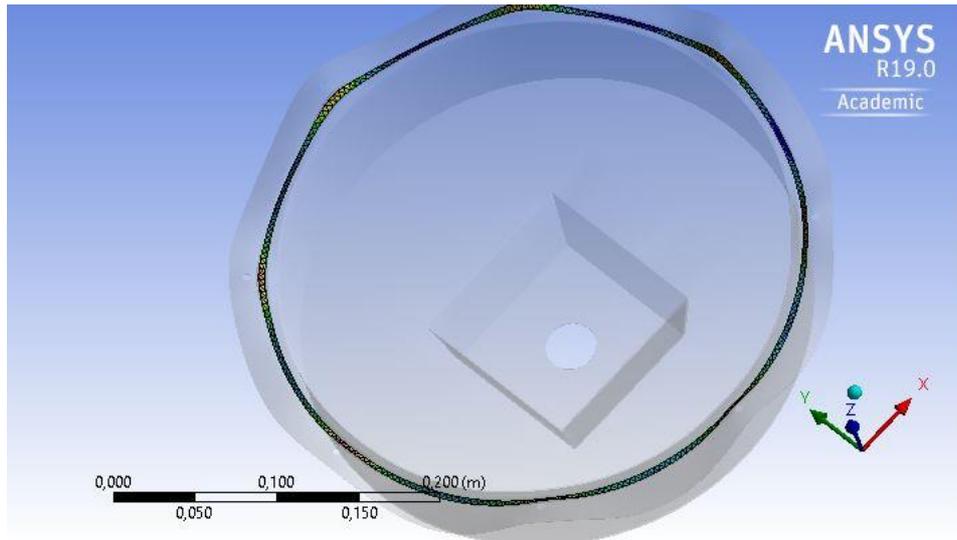


Figura 4-16. Deformación de la zona de la base en la que se asienta la junta.

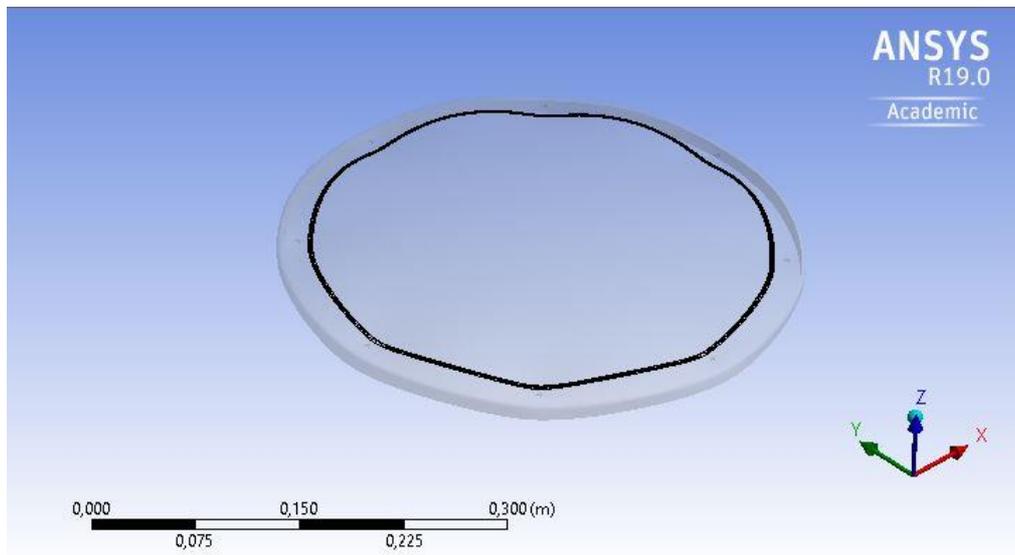


Figura 4-17. Deformación de la zona de la junta en la que se asienta la junta.

Por último, hay que tener en cuenta que los tornillos y las tuercas se apoyan en ambas partes creando zonas con condiciones de contorno en desplazamiento nulas mayores que los propios agujeros. Para tener en cuenta este efecto se ha supuesto que las cabezas de los tornillos tienen un radio de 7 mm y las tuercas un radio de 6mm. Los resultados obtenidos introduciendo estas nuevas condiciones de contorno en el último diseño se expresan en la siguiente tabla.

Tabla 4-3. Iteraciones con nuevo diseño teniendo en cuenta la superficie de los tornillos y de las tuercas

| Iteración | Deformación media en la base | Deformación media en la Tapa |
|-----------|------------------------------|------------------------------|
| 1 | -2.5937e-4 m | 9.0825e-5 m |
| 2 | -1.7556e-4 m | 6.1477e-5 m |
| 3 | -2.0614e-4 m | 7.2183e-5 m |
| 4 | -1.9498e-4 m | 6.8278e-5 m |
| 5 | -1.9905e-4 m | 6.9702e-5 m |
| 6 | -1.9756e-4 m | 6.918e-5 m |
| 7 | -1.9813e-4 m | 6.9379e-5 m |
| 8 | -1.979e-4 m | 6.9299e-5 m |
| 9 | -1.9798e-4 m | 6.9328e-5 m |
| 10 | -1.9797e-4 m | 6.9322e-5 m |

De esta forma se obtiene que la deformación media en la junta es de 0.733 mm (24,43 %), lo que supone una presión media de 1.22 Mpa. La deformación mínima de la junta es de 0.605 mm (20.17 %), por lo que la mínima presión ejercida es de 1.008 MPa. Por otra parte, la máxima deformación de la junta es de 0.9335 mm (31.11 %), lo que supone una presión de 1.556 MPa.

A priori es un resultado aceptable ya que los requerimientos no son exigentes, sin embargo, para asegurar que la solución es válida, se comprueba que se encuentra entre los límites establecidos de compresión inicial para juntas. En este caso se ha consultado el manual de la empresa TRELLEBORG y aunque no se trata de una junta tórica al uso, ya que es de sección cuadrada, se ha supuesto que d_2 coincide con el lado de la junta que en este caso es de 3 mm:

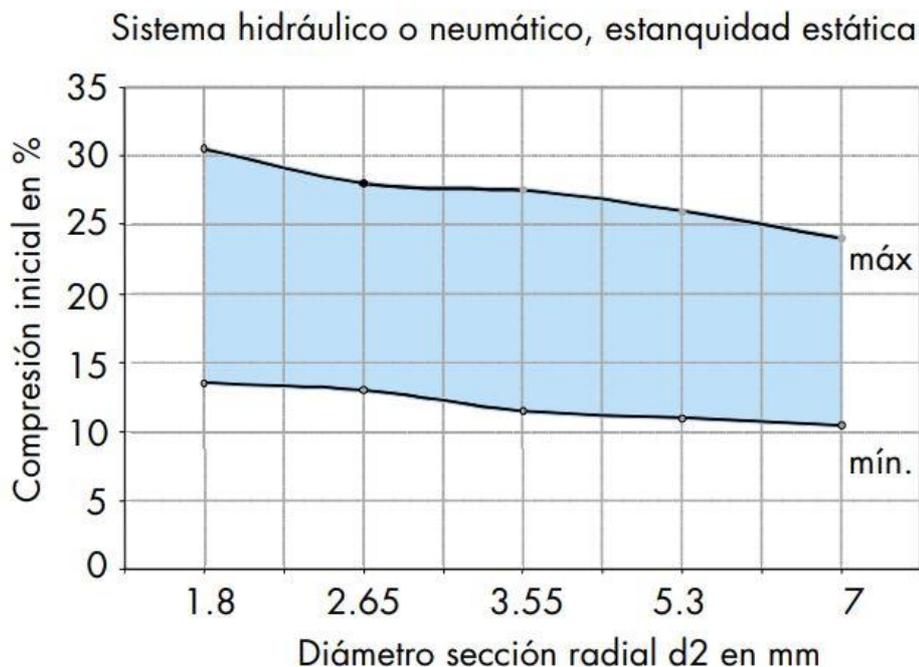


Figura 4-18. Recomendaciones para compresión inicial de la junta. [9]

Como se puede apreciar, en el caso que estamos tratando la compresión media es del 24.43 %, la mínima del 20.17 %, y la máxima del 31.11%, por lo que la compresión obtenida se encuentra dentro del rango aceptable excepto en el caso de la deformación máxima que es ligeramente superior a la recomendable. Aunque se podrían realizar variaciones en algunas características como el espesor para que la deformación máxima se encontrara dentro del rango, incluso con espesores más pequeños la deformación sigue siendo de un 30 %, ya que la deformación máxima se produce sólo en las zonas cercanas a los taladros como se puede apreciar en la siguiente ilustración.

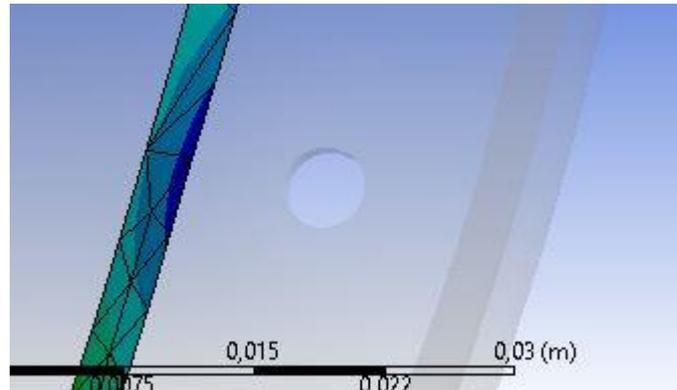


Figura 4-19. Deformación en la zona cercana a los orificios.

5 ANÁLISIS DEL PROTOTIPO FINAL

Aunque el empleo de prensaestopas asegura la estanqueidad de manera efectiva, el desconocimiento de las características del agua podría provocar, en algunos casos, un fallo prematuro en estos elementos provocando la filtración de agua y por lo tanto el fallo de los componentes electrónicos. Por otra parte, y aunque de menor importancia, al ser un sistema que será comercializado, debe presentar una imagen atractiva, por lo que se necesita una solución que combine ambos requisitos. Para minimizar el riesgo de fuga, y al emplear un material metálico de pequeño espesor, una posible alternativa es utilizar la propia carcasa como emisor, es decir, extraer el emisor propiamente dicho de su envolvente, para colocarlos en las paredes de la carcasa. De esta manera se evita la entrada de agua a través de los orificios de los emisores, ya que no es necesaria la realización de taladros y además se mejora el aspecto de la carcasa. Para estudiar la viabilidad de esta alternativa, hay que comprobar que la transmisión de ultrasonidos es efectiva, para ello es necesario un análisis mecánico de la carcasa para analizar su comportamiento ante esta excitación, y un análisis acústico para determinar la emisión producida con este sistema.

5.1 Análisis modal

El principal problema mecánico que puede provocar el hecho de colocar los emisores en las paredes de la carcasa, aparte de la atenuación de la señal, es la entrada en resonancia del dispositivo, ya que provocaría un aumento de las pérdidas y por lo tanto una reducción en la capacidad de emisión. Para determinar la posibilidad de que esto ocurra, es necesario realizar un análisis modal de la carcasa para calcular los modos y frecuencias de vibración de ésta y comprobar que no coinciden con el rango de frecuencias de los emisores. Para ello, se ha modelado en ANSYS un sistema que cuenta sólo con el taladro en la parte inferior para la alimentación externa, y se han restringido los desplazamientos en los agujeros de los tornillos de la parte superior. El cálculo se ha realizado tanto en ANSYS APDL, como en el módulo modal de ANSYS WORKBENCH, llegando a la conclusión en ambos casos de que las frecuencias de la vibración forzada provocada por los emisores no excitarán ninguno de los modos de vibración del sistema.

5.2 Análisis acústico

Para determinar si esta solución es efectiva, es necesario conocer el nivel de presión que se produce empleando este diseño y compararlo con el nivel producido por un emisor convencional en contacto con el agua. Para ello se ha empleado el módulo de 'Harmonic Acoustics' del programa ANSYS WORKBENCH R19.

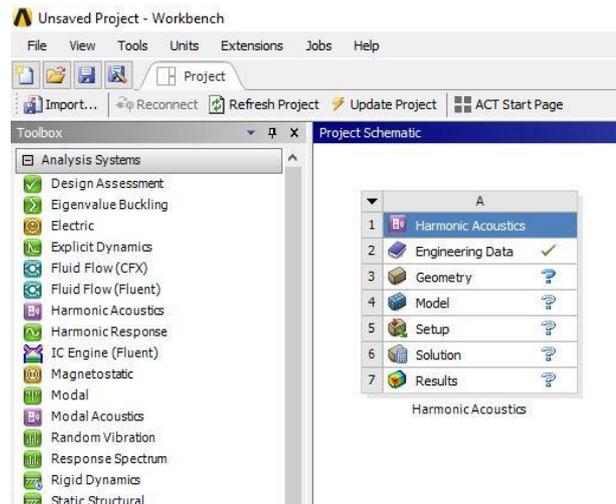


Figura 5-1. Módulo 'Harmonic Acoustics'.

Para la realización de estas simulaciones, se han consultado los diferentes *Webinars* que ANSYS pone a disposición de forma gratuita en su página web. [15]

En primer lugar, es necesario determinar la presión ejercida por cada emisor sobre la pared del dispositivo. Debido a la escasa información proporcionada por el fabricante en este ámbito, se diseña un modelo de un emisor y se calcula la presión necesaria que se debe aplicar para alcanzar el nivel de presión acústica indicado por el fabricante. Para realizar la simulación se realiza el diseño un emisor mediante el programa SOLID EDGE ST9 a partir de los planos proporcionados y se supone un espesor de pared de 0.15 mm.



Figura 5-2. Emisor diseñado en SOLID EDGE.

Una vez realizado el diseño, éste es importado desde la sección 'Geometry' del módulo de 'Harmonic Acoustics' empleado en ANSYS tras cambiar su formato a IGES. En esta sección es necesario introducir el elemento dentro de una esfera que simulará el agua que se encuentra a su alrededor cuando el emisor está en funcionamiento, para ello, se emplea la herramienta 'Enclosure'. Debido a las limitaciones numéricas del programa, ya que se trata de la versión académica, la esfera que rodea el elemento es de un tamaño reducido, ya que no es necesario que abarque toda la superficie a estudiar como se verá posteriormente.

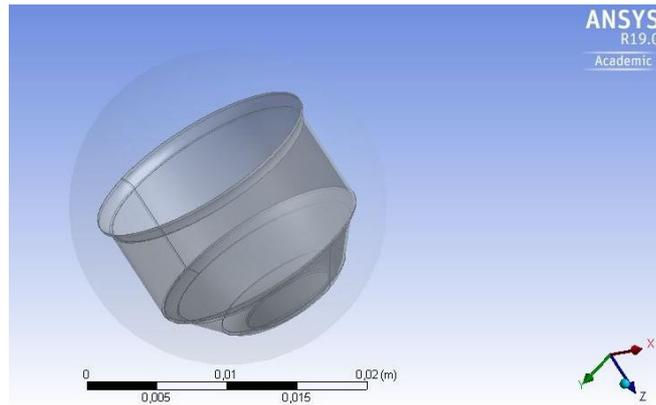


Figura 5-3. 'Enclosure' del emisor.

Tras haber realizado la geometría, es necesario indicar las condiciones de mallado y de la simulación, para lo que se emplea la sección 'Model'. En primer lugar, se selecciona el material que compone cada elemento, para lo que previamente se ha necesitado introducir los materiales a emplear en la sección 'Engineering Data', que en este caso son agua líquida y aluminio. Para introducir los materiales, se selecciona la geometría de cada cuerpo en el árbol y se escoge el material de cada uno de ellos.

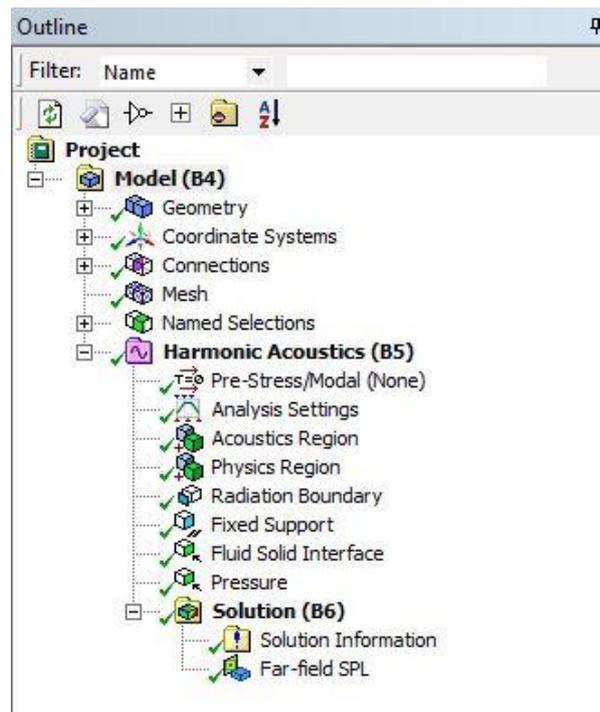


Figura 5-4. Sección 'Model'.

Como ya se ha comentado, el límite numérico del programa impide el cálculo cuando el número de elementos supera un valor determinado, por lo que el mallado empleado es grueso. Para realizar este tipo de mallado es necesario seleccionar en 'Mesh' la opción 'Uniform' en el apartado 'Sizing'. Una vez seleccionado un tamaño relativamente grande para todo el cuerpo, se afina el mallado lo máximo posible en las zonas más relevantes, que en este caso es la zona en la que se aplicará la presión. Esta operación se realiza insertando un 'Face Sizing' en las zonas requeridas, disminuyendo el tamaño de los elementos tanto como sea posible.

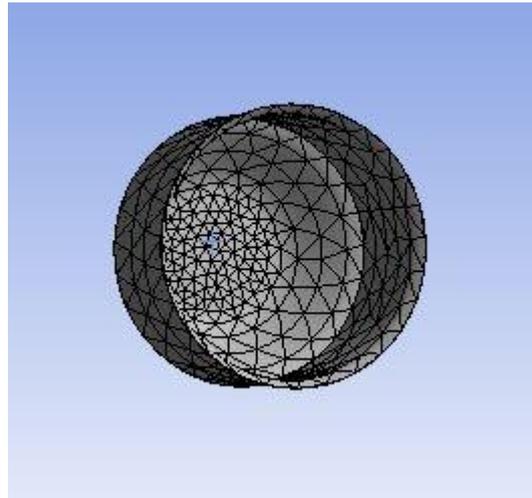


Figura 5-5. Mallado del emisor.

Una vez determinado el modelo de elementos finitos que se va a emplear, se deben introducir las distintas condiciones en las que se va a realizar la simulación. En primer lugar, es necesario definir el rango de frecuencias en el que se aplica la presión, por lo que se introduce el valor mínimo y máximo de este rango en el apartado ‘Analysis Settings’, que en este caso son de 39000 y 41000 Hz. Por otra parte, también es necesario indicar el número de divisiones de este rango que se van a realizar que en este caso es de 10.

Para indicar el volumen a través del que se propagarán las ondas de presión, se selecciona la esfera como elemento ‘Acoustic Region’ dentro del árbol.

Como ya se ha comentado, en el módulo en el que se está trabajando es necesario definir el comportamiento de cada elemento. La esfera actuará como cuerpo acústico, pero es necesario seleccionar que el comportamiento del emisor será de tipo estructural, ya que será este elemento el que vibre cuando se aplique la presión. Utilizando la herramienta ‘Physics Region’ se selecciona el cuerpo del emisor y se elige el comportamiento ‘Structural’.

Debido a que la esfera que rodea el emisor es de menor tamaño que la zona en la que se quiere estudiar el nivel de presión, los límites de esta esfera no deben reflejar las ondas de presión para no afectar a los datos proporcionados, por lo que se define la superficie externa de la esfera como ‘Radiation Boundary’.

Por otra parte, para simular el contacto entre el fluido y el sólido, es necesario indicar una zona de interfase fluido-sólido, para lo que se emplea la herramienta ‘FSI’ (‘Fluid Solid Interface’) indicando estas superficies de contacto, que en este caso serán las caras interiores de la esfera que rodea el emisor. [5]

Por último, se aplican las condiciones de contorno sobre el emisor, fijando la corona circular posterior al elemento y aplicando la presión en la cara interna de la superficie de emisión.

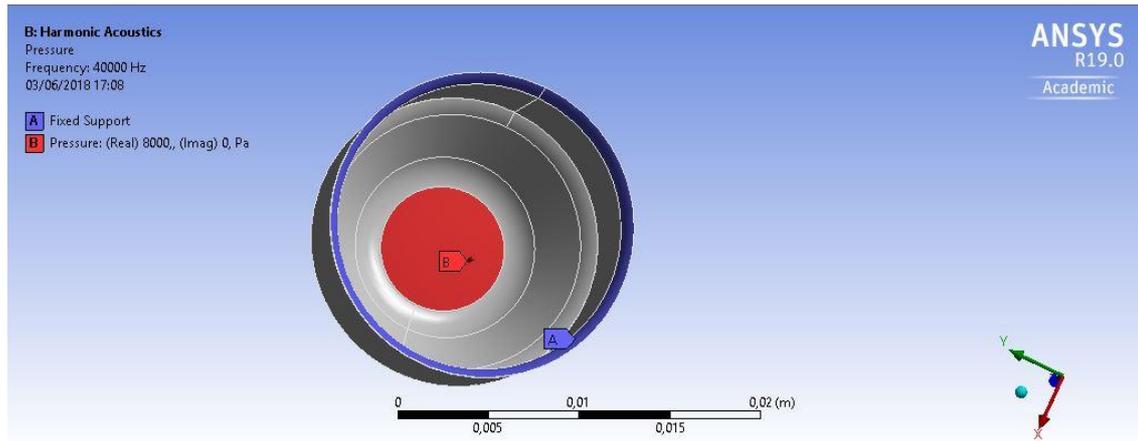


Figura 5-6. Condiciones de contorno y zona de aplicación de la presión en el emisor.

Una vez resuelta la simulación, es necesario variar la presión aplicada hasta alcanzar el nivel de presión adecuado. En concreto, el fabricante asegura que el nivel mínimo de presión a 30 cm de la superficie de emisión es de 117 dB. Para calcular el nivel de presión en esta zona, se emplea la herramienta ‘Far Field SPL’, con la que se obtiene el nivel de presión incluso fuera de la región acústica. El fabricante indica que la zona que máxima efectividad del emisor se encuentra entre -80° y 80° , por lo que la zona del ‘Far Field SPL’ abarcará un ángulo de entre 0° y 40° en los planos ZX y ZY, como se puede apreciar en la siguiente ilustración.



Figura 5-7. ‘SPL’ del emisor.

Como ya se ha comentado, debido a las limitaciones numéricas, y por lo tanto al tamaño de los elementos, para algunas frecuencias y puntos determinados los valores no concuerdan con el resto de valores obtenidos en la simulación, por lo que en lugar de buscar la presión para la cual se obtiene un mínimo de 117 dB a 30 cm, se realiza la media de los valores obtenidos en todos los puntos y para todas las frecuencias, siendo necesaria una presión de 10200 Pa para que la media sea aproximadamente de 117 dB.

Conocida la presión ejercida por el emisor, se debe determinar la atenuación provocada por la geometría de la carcasa en la que irán colocados, ya que tanto la forma como el espesor de la chapa son distintos y será necesario determinar si existe la posibilidad de reducir esta atenuación realizando variaciones en el diseño.

En primer lugar, se realiza la simulación para el modelo ya estudiado. El procedimiento es el mismo que para el caso del emisor, pero en este caso se han incorporado cilindros de 1 mm de radio de resina epoxy en el centro de las cuatro caras laterales para simular el comportamiento del adhesivo entre el elemento emisor y la

pared de la carcasa. El espesor de estos cilindros se ha supuesto de 0.05 mm ya que es el mínimo espesor con el que se suele trabajar y con el fin de reducir lo máximo posible la atenuación. Es en la cara superior de estos cilindros donde se aplica la presión y se utiliza un contacto tipo 'Bonded' en la zona de contacto entre la resina y la cara del dispositivo. Además, se ha supuesto que los orificios de los tornillos se comportan como soportes fijos para restringir el dispositivo en la simulación.

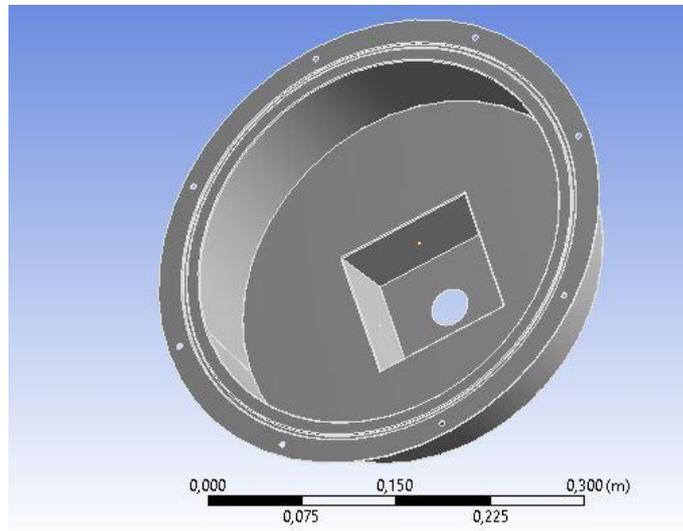


Figura 5-8. Primer modelo para simulación acústica.

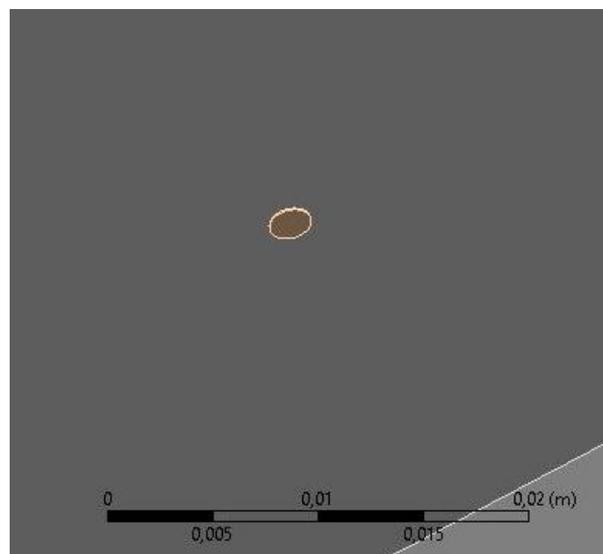


Figura 5-9. Cilindros para simulación del adhesivo.

En cuanto al mallado, y al igual que en caso anterior, los problemas de limitación numérica impiden la realización de un mallado lo suficientemente fino, por lo que aunque tomaremos estos valores como aproximados, sería necesario comprobarlos con un mallado más fino en las zonas apropiadas. La incidencia de este problema se ha intentado disminuir de la misma forma que en el caso del emisor, realizando un mallado grueso en todo el dispositivo, y después afinando en las zonas de mayor interés, que en este caso son las zonas de las caras laterales en la que se encuentran los emisores.

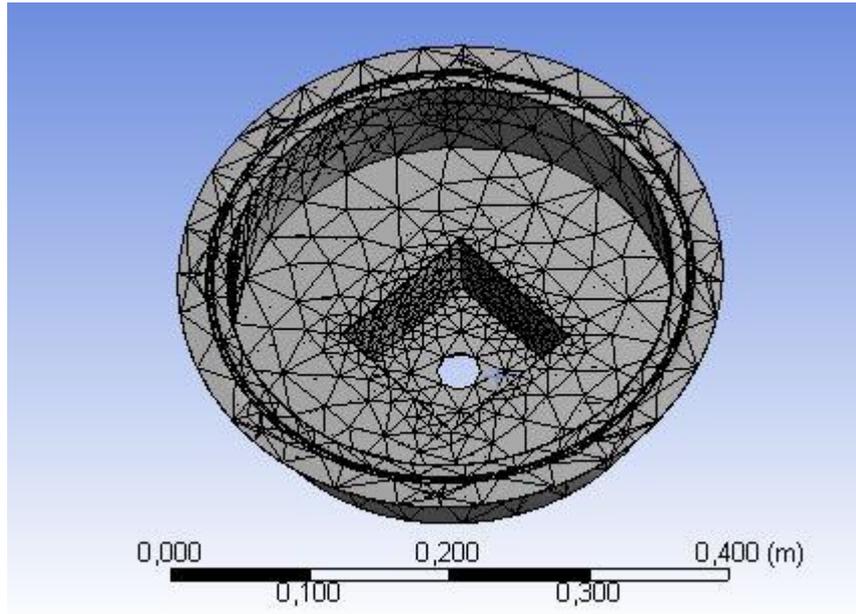


Figura 5-10. Mallado del primer modelo para simulación acústica.

Con el fin de comparar los resultados de esta simulación con la utilización de emisores en contacto con el agua en las cuatro caras, se ha diseñado el 'Far Field SPL' en la zona en la que actuarían estos emisores que comprende un rango de 80° desde el punto de emisión. Para simplificar la obtención de resultados, la zona de medición se ha colocado sólo en una de las caras de emisión. Además, al igual que en el caso de la simulación del emisor, se ha realizado la media de los resultados en todos los puntos y para todas las frecuencias.

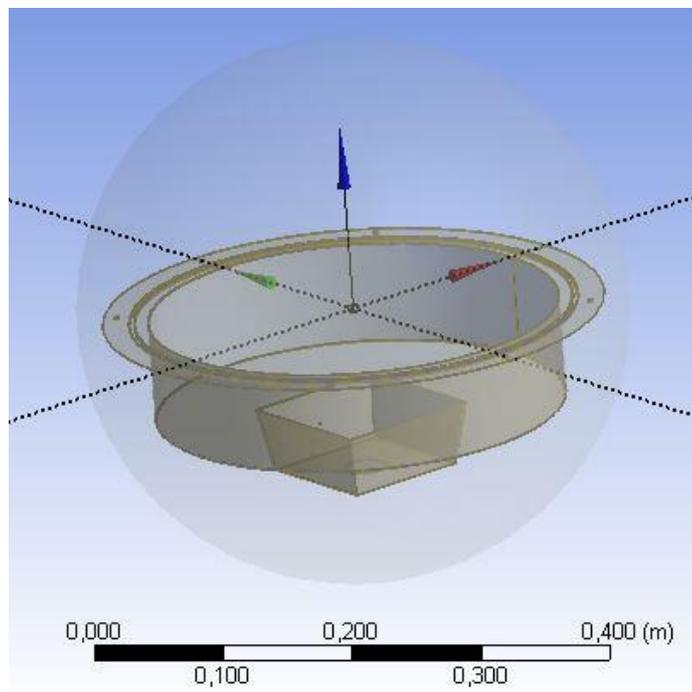


Figura 5-11. 'Enclosure' del primer modelo para simulación acústica.

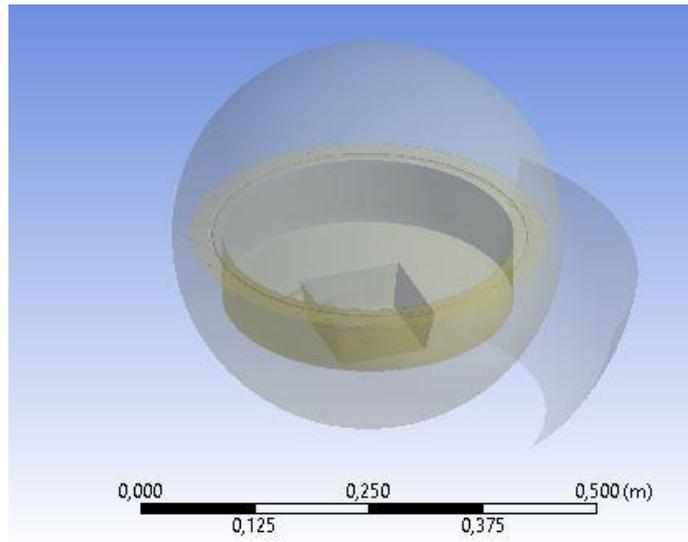


Figura 5-12. 'Far Field SPL' empleado.

De las simulaciones se obtiene sólo el nivel de presión en decibelios, es decir, comparado con una presión de referencia, para determinar el nivel de presión producido en pascales y de esta forma poder calcular la atenuación, se emplea la siguiente expresión: [14]

$$SPL(dB) = 20 \times \log_{10} \frac{P}{20 \times 10^{-6}} \quad (5-1)$$

Donde SPL es el nivel de presión en decibelios, $20 \cdot 10^{-6}$ es la presión de referencia y P es el nivel de presión en pascales.

Esta simulación proporciona un nivel de presión media de 58.42 dB, lo que supone sólo un 0.12% de la presión que proporcionan los emisores. Este resultado no es aceptable, ya que la atenuación producida es excesiva. Una posible solución es reducir el espesor de la chapa del dispositivo, por lo que se realiza el estudio sobre el mismo diseño, pero empleando en este caso una chapa de 0.5 mm de espesor, obteniéndose un nivel de presión media de 95.38 dB, que, aunque más elevado que en el caso anterior, sigue suponiendo una atenuación considerable. Además, la reducción del espesor de chapa supone una menor rigidez en la zona de la junta, con la consecuente pérdida de presión y por lo tanto el aumento del riesgo de fugas.

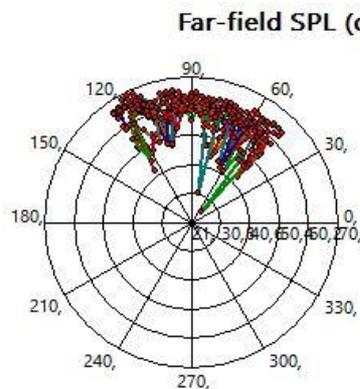


Figura 5-13. Resultados obtenidos de la simulación.

Debido a las múltiples variables que entran en juego en esta simulación, es difícil conocer a priori que cambios

en el diseño pueden suponer una mejora en la emisión de los ultrasonidos. Por ello, se ha seguido un procedimiento de prueba y error para obtener el modelo más adecuado.

A este efecto se han diseñado diferentes modelos, todos con una chapa de 1 mm de grosor, en los que alguna característica ha sido modificada respecto al modelo inicial anteriormente estudiado. Además, con la intención de disminuir la atenuación, en la mayoría de los diseños que se exponen a continuación se han incluido agujeros no pasantes de 0.85 mm de profundidad. Una vez se haya encontrado el modelo más adecuado, se estudiarán las diferentes atenuaciones con y sin estos agujeros. La única variable que no sufrirá modificaciones a lo largo del proceso es el tamaño de la embutición en el cajetín, ya que es necesario que un operador realice tareas de montaje en su interior, por lo que se quiere mantener la accesibilidad a esta zona, además, se necesita un espacio alrededor del orificio interior para que se pueda colocar sin problemas el prensaestopas a través del cual llegará la alimentación externa. Aunque esta variable no será modificada, la incidencia de la profundidad de embutición sí será estudiada.

5.3 Modelo 1

En este modelo se han utilizado unos radios de acuerdo de 1 mm y se han empleado los agujeros no pasantes anteriormente comentados con un tamaño de 20 mm de diámetro.

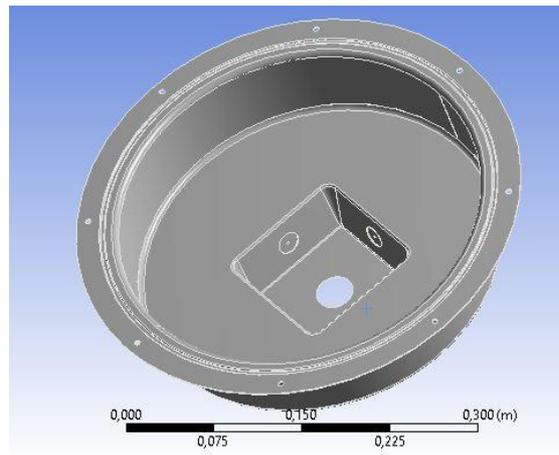


Figura 5-14. Modelo 1.

5.4 Modelo 2 y 3

Para determinar la influencia de los radios de acuerdo, se realizan dos modelos, que al igual que en el caso anterior disponen de estos agujeros no pasantes, pero cuyos radios de acuerdo varían. En el modelo 2, todos los radios de acuerdo del cajetín son de 10 mm y en el modelo 3, los radios de acuerdo del punzón y la matriz son de 15 mm mientras el radio de las esquinas es de 30 mm.

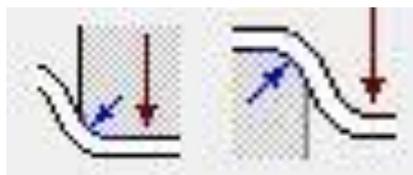


Figura 5-15. Radio del punzón (izquierda) y radio de la matriz (derecha).

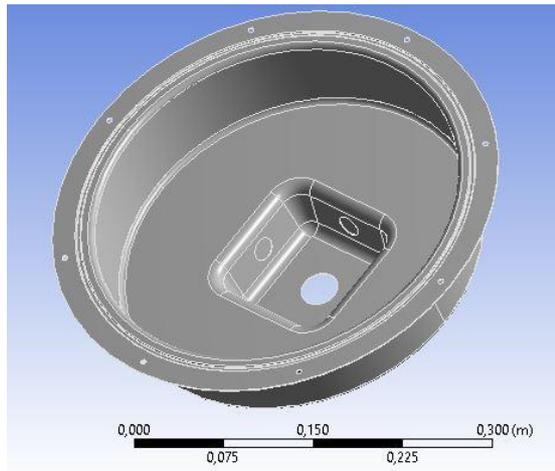


Figura 5-16. Modelo 2.

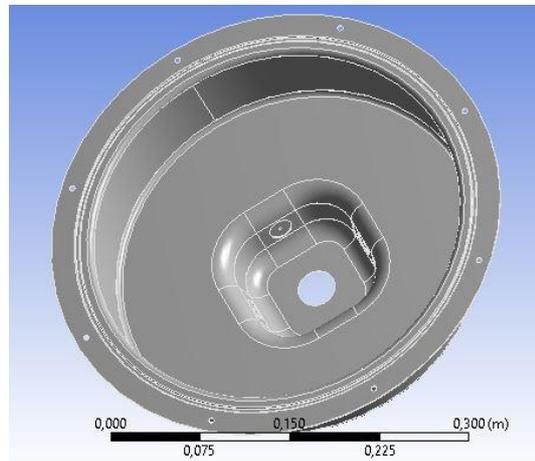


Figura 5-17. Modelo 3.

5.5 Modelo 4

Para obtener la influencia de los agujeros no pasantes en la atenuación de la señal, en este modelo se emplea como base el modelo 2 y se utilizan agujeros de 32 mm de diámetro en lugar de 20 mm.

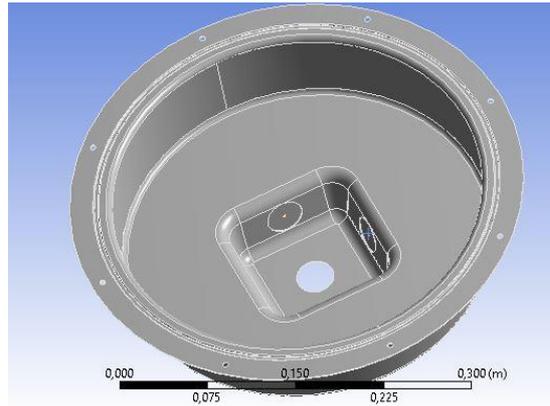


Figura 5-18. Modelo 4.

5.6 Modelo 5, 6 y 7

Como ya se ha comentado, durante todo este proceso se van a mantener constantes las dimensiones del punzón, pero no así la profundidad de embutición. Estos modelos utilizan como base el modelo 2 pero variando las profundidades, siendo estas de 75 mm para el modelo 5 y de 40 mm para el modelo 6.

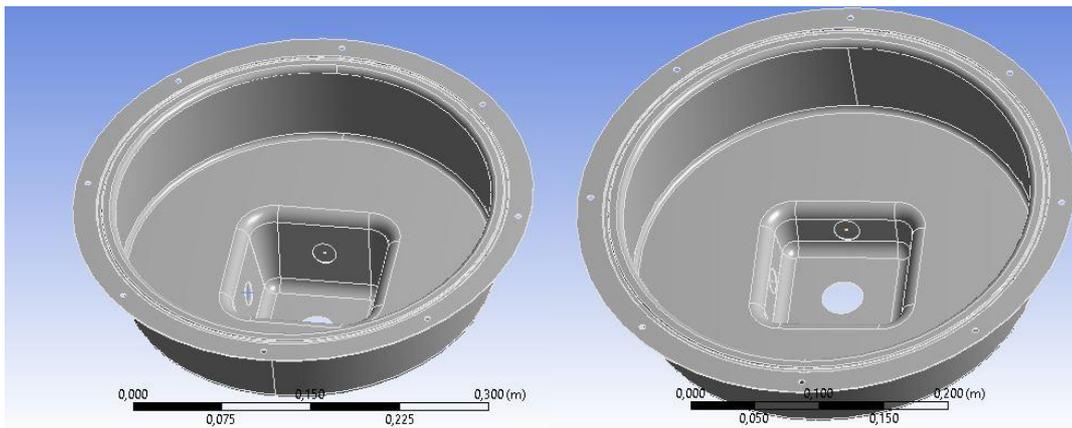


Figura 5-19. Modelo 5 (izquierda) y Modelo 6 (derecha).

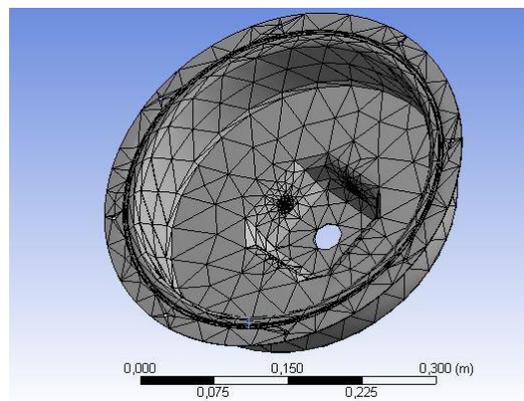


Figura 5-20. Mallado de los modelos con agujeros no pasantes.

5.7 Análisis acústico comparativo

Al igual que en el primer caso, y al variar la profundidad de emisión, también se ha calculado la zona de 'Far Field SPL' teniendo en cuenta como sería si se utilizaran emisores convencionales como se muestra en la siguiente figura para los modelos con diferente profundidad de embutición, siendo la zona de incidencia la que se encuentra entre las líneas rojas.

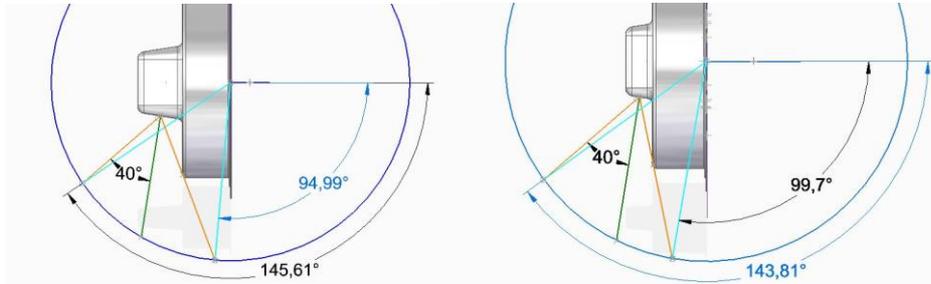


Figura 5-21. Cálculo geométrico de la zona de incidencia de los ultrasonidos de los emisores sobre una esfera de 30 cm de radio para el modelo 5 (izquierda) y modelo 6 (derecha).

Tabla 5-1. Comparación del nivel de presión para los distintos modelos

| Modelo | Nivel de Presión Medio a 30 centímetros |
|----------|-----------------------------------------|
| Modelo 1 | 98.93 dB |
| Modelo 2 | 95.17 dB |
| Modelo 3 | 105 dB |
| Modelo 4 | 101.88 dB |
| Modelo 5 | 101.55 dB |
| Modelo 6 | 103.9 dB |

De estos resultados se desprende que el nivel de presión producida aumenta cuanto mayores son los radios de acuerdo, los agujeros pasantes, y cuanto menor es la profundidad de embutición del cajetín.

Con estos datos se pueden descartar varios diseños y centrarse en aquellos que tienen los mejores resultados, realizando las modificaciones oportunas según los resultados obtenidos. Para ello, se realiza un modelo con una profundidad de embutición de 40 mm y maximizando los radios de acuerdo. Debido a que disminuye el tamaño de la zona de los agujeros, éstos se mantienen con el tamaño inicial de 20 mm de diámetro.

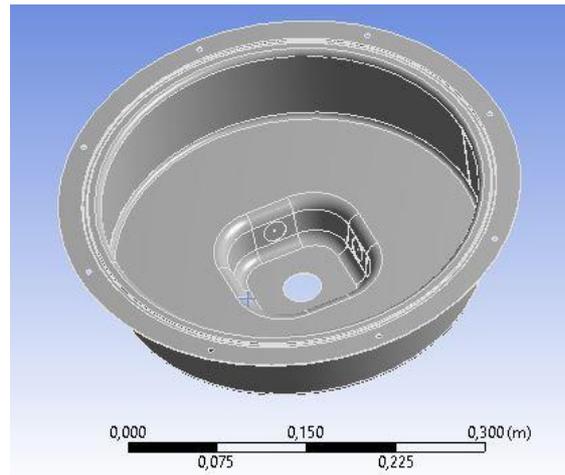


Figura 5-22. Modelo 6.1.

Sin embargo, con este nuevo modelo, el nivel de presión medio se sitúa en 102.83 dB, inferior al obtenido con el modelo con menores radios de acuerdo, por lo que el proceso se centrará en este modelo.

Aunque se ha visto que el modelo 6 es el más adecuado, con los datos recogidos en la Tabla 6 se podría intuir que, a menor profundidad, mayor nivel de presión, por lo que antes de continuar con el desarrollo de este modelo, se simularán diferentes diseños cada uno a una menor profundidad:

- Modelo 6: 40 mm de profundidad.
- Modelo 7: 35 mm de profundidad.
- Modelo 8: 30 mm de profundidad.
- Modelo 9: 25 mm de profundidad.

Para agilizar el proceso de selección la simulación de estos modelos se realizará sin resina y sin emplear los agujeros no pasantes.

Tabla 5-2. Comparativa de los niveles de presión de los modelos con distintas profundidades de embutición

| Modelo | Nivel de Presión Medio a 30 centímetros |
|----------|-----------------------------------------|
| Modelo 6 | 102.88 dB |
| Modelo 7 | 107.55 dB |
| Modelo 8 | 110.99 dB |
| Modelo 9 | 111.9 dB |

Se puede apreciar que se cumple lo expuesto anteriormente, por lo que se podría seguir reduciendo la profundidad del cajetín para seguir aumentando el nivel de presión, sin embargo, debido al proceso de fabricación a emplear y a los radios de acuerdo que se necesitan, se determina que con menos de 25 mm, los radios de acuerdo de matriz y punzón necesarios podrían provocar fallos durante el procedimiento de fabricación.

Aunque con el Modelo 9 se obtienen los mejores resultados, debido a las diferentes variables que intervienen, todavía no se descartará el Modelo 7. En esta decisión influyen aspectos como por ejemplo la realización de los agujeros no pasantes, ya que como se ha visto disminuyen la atenuación y no tendrían sentido en el Modelo 9 debido a la falta de espacio, pero sí en el 7.

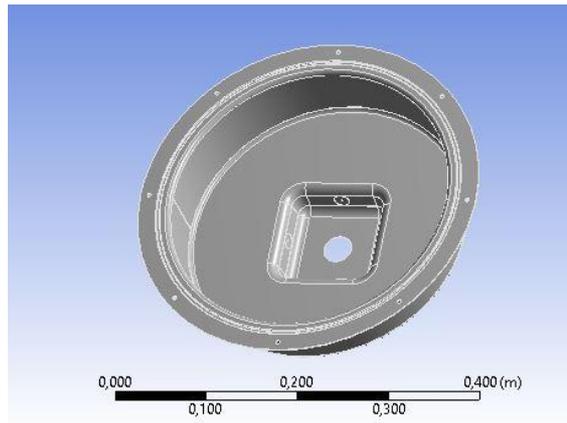


Figura 5-23. Modelo 7.

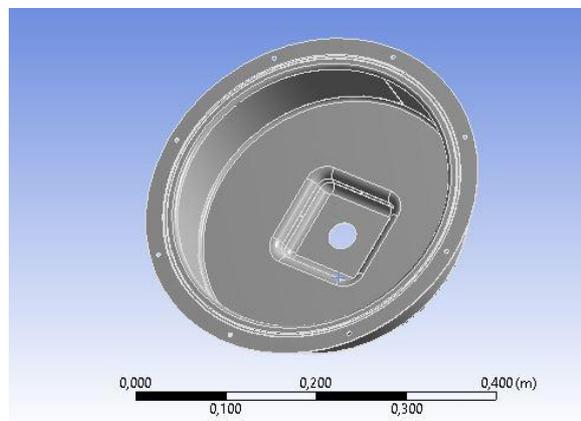


Figura 5-24. Modelo 9.

En primer lugar, es necesario observar cómo afecta el adhesivo a la atenuación, ya que para la primera comparación entre los diferentes modelos se ha supuesto una resina epoxi almacenada en la biblioteca de materiales del programa, y no se ha utilizado en la última comparación realizada. Para ello, se realiza la misma simulación, pero en este caso incluyendo los cilindros de adhesivo.

Tabla 5-3. Atenuación provocada por el adhesivo

| Modelo | Con Resina | Sin Resina |
|-----------------------------------|------------|------------|
| Modelo 7 | 102.83 dB | 107.55 dB |
| Modelo 7 con agujeros no pasantes | 103.9 dB | 111.38 dB |
| Modelo 9 | 104.46 dB | 111.9 dB |

Se observa como en los modelos sin adhesivo el nivel de presión es mayor, siendo el modelo 9 el que mejor se comporta cuando se emplea el adhesivo, incluso comparado con el modelo 7 cuando se emplean los agujeros no pasantes, por lo que es el mejor candidato para desempeñar esta función, y será objeto de los siguientes estudios.

5.7.1 Diferentes adhesivos, cámara de aire y amortiguamiento

Hasta el momento no se han tenido en cuenta los diferentes tipos de resinas que existen en el mercado, por lo que será necesario calcular las diferentes situaciones que producen los distintos adhesivos. Además, para agilizar el procedimiento de selección comentado, no se ha supuesto amortiguamiento estructural en el dispositivo. Por último, y por el mismo motivo, la esfera que rodea el dispositivo ha sido definida completamente de agua, cuando en el caso real la zona en la que se encuentran los emisores estará rodeada de agua por la parte exterior y de aire por la zona interior.

Para considerar los diferentes tipos de resinas que se ofertan, se toma como referencia la gama LOCTITE y se emplean el adhesivo con menor y mayor módulo de elasticidad para determinar su influencia en la atenuación de la señal. Estos adhesivos son el LOCTITE 518 y el LOCTITE EA 9480 con 54 N/mm² y 4400 N/mm² respectivamente, además con el fin de estudiar si la rigidez del adhesivo es crítica, se supondrá el uso de aluminio como adhesivo a modo de soldadura.

Para realizar la simulación, se crea una nueva carpeta para los adhesivos incluyendo sus propiedades, que en este caso son su densidad y el módulo de Young, ya que el resto se calculan directamente a partir de éstas. Como ya se ha comentado, se utilizará el modelo 9 y se creará una cámara de aire en la zona del cajetín.

Por otra parte, a partir de los resultados anteriores se podría intuir que, a mayor rigidez en la zona de emisión, mayor nivel de presión producido, por lo que para considerar esta influencia se realiza una simulación empleando el modelo comentado, pero utilizando cobre en lugar de aluminio. A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

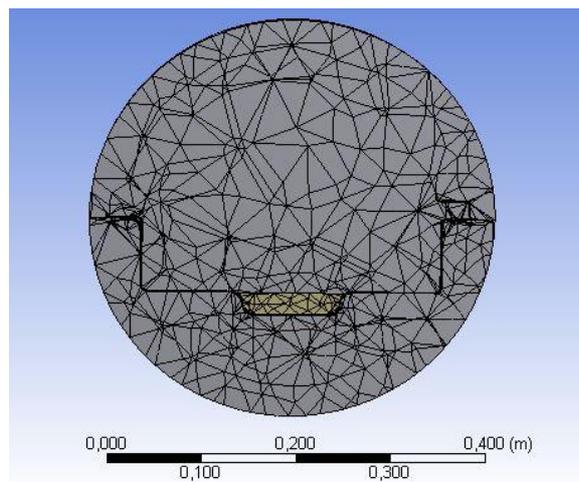


Figura 5-25. Mallado incluyendo la cámara de aire.

Tabla 5-4. Comparación de los diferentes adhesivos

| Modelo | Nivel de Presión Medio a 30 centímetros |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Con resina epoxi de la biblioteca de ANSYS | 109.65 dB |
| LOCTITE 518 | 109.21 dB |
| LOCTITE 9480 | 109.77 dB |
| Con 'soldadura' de aluminio | 109.89 dB |
| Cobre con resina epoxi de la biblioteca de ANSYS | 107.93 dB |

De estos resultados se desprende que, aunque los resultados con los distintos tipos de adhesivos difieren, la diferencia producida es escasa, lo que puede ser explicado por el pequeño espesor que se ha supuesto para la simulación. Además, en el caso en el que se ha empleado aluminio a modo de soldadura el resultado ha sido mayor pero muy similar al obtenido anteriormente, por lo que la mejor opción es el empleo de adhesivos ya que la realización de soldaduras requeriría de mayor tiempo y de un incremento del presupuesto.

Por otra parte, se puede observar que los resultados obtenidos en este caso son algo menores que en el caso en el que no se empleaba cámara de aire en la zona de los emisores emisores.

Por último, el empleo de cobre en lugar de aluminio no aumenta el nivel de presión, sino que éste disminuye, descartando este material para la fabricación de la carcasa.

La última variable que se ha de tener en consideración a la hora de realizar la simulación es el amortiguamiento estructural de la carcasa. Aunque el aluminio es un material con un amortiguamiento muy bajo, es necesario determinar su influencia en el nivel de presión producido.

Para incluir el amortiguamiento en la simulación acústica es necesario calcular los valores de α y β , ya que son estos los que se introducen como datos en la simulación. Estos parámetros multiplican a las matrices de masa y rigidez para obtener el amortiguamiento del sistema.

$$C = \alpha M + \beta K \quad (5-2)$$

La magnitud de estas variables depende de la frecuencia y pueden ser calculados a partir del valor del coeficiente de amortiguamiento. El programa de simulación ofrece la posibilidad de calcular estos valores de forma automática. Para ello, se supone un coeficiente de amortiguamiento de 10^{-5} ya que, como se ha comentado, el amortiguamiento estructural del aluminio es bajo y este es un valor aceptado como coeficiente de amortiguamiento para este material. Además, se ha supuesto un valor de α nulo y se ha calculado β para una frecuencia de 40000 Hz (valor intermedio del rango de frecuencia de los emisores), obteniendo un valor de $\beta=7.96 \cdot 10^{-11}$. [12]

Debido a este valor reducido y al pequeño espesor de la carcasa, los resultados obtenidos en la simulación no difieren de forma apreciable de los obtenidos sin considerar el parámetro de amortiguamiento, por lo que se puede concluir que el valor del nivel de presión medio a 30 cm es el expuesto anteriormente en la Tabla 6-4, siendo el Modelo 9 el diseño con el mejor funcionamiento, produciéndose una atenuación del 60% respecto al nivel de presión producido por los emisores convencionales.

5.8 Estudio del modelo seleccionado

Una vez realizado el estudio de viabilidad acústica del modelo, es necesario comprobar como afectan las distintas modificaciones realizadas a la flotabilidad y estabilidad así como estudiar el nivel de presión alrededor del sistema.

5.8.1 Flotabilidad y estabilidad

Para comprobar que el dispositivo se mantiene a flote y que su comportamiento es estable, se sigue el mismo procedimiento de los apartados 5.1 y 5.2 teniendo en cuenta las variaciones que se han realizado respecto al modelo utilizado en esos apartados, como son el aumento del espesor de la tapa y la disminución de la profundidad del cajetín.

Estas modificaciones aumentan el peso hasta los 1.896 kg y disminuyen el empuje proporcionado por el cajetín debido a la reducción de su volumen, provocando que la línea de flotación se encuentre ahora a 6.17 cm por encima respecto a la profundidad de embutición del cajetín.

Por otra parte, el aumento del peso de la tapa en la zona superior también afecta a la estabilidad del dispositivo ya que sube el centro de gravedad global, aunque se comprueba de manera geométrica que el brazo de adrizamiento sigue siendo positivo, por lo que el dispositivo sigue siendo estable.

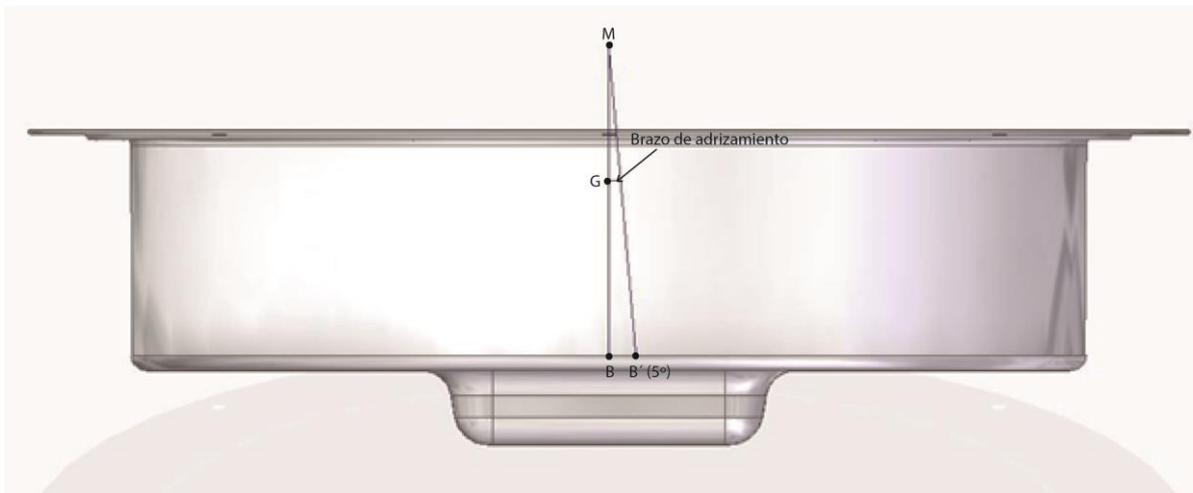


Figura 5-26. Determinación geométrica de la estabilidad en el modelo seleccionado.

5.8.2 Nivel de presión

En los apartados anteriores se ha estudiado el nivel de presión producido en la misma zona en la que actuarían los emisores para comprobar si la solución alternativa era viable. En este apartado se estudia el nivel de presión, pero no solo en esa zona sino alrededor de todo el dispositivo y a varias distancias para calcular como variará la señal cuando el dispositivo se encuentre en funcionamiento. Para ello se utiliza el ultimo modelo simulado, es decir, incluyendo la resina epoxi de la biblioteca de ANSYS y la cámara de aire en la zona de los emisores.

Para obtener los resultados se ha calculado el nivel de presión entre 0.5 y 4 m cada 0.5 m, utilizando en este caso un 'Far Field SPL' que rodea todo el dispositivo, y que está formado sólo por una línea cuyo radio y profundidad varían en función de la distancia a la que se está calculando en nivel de presión para medir en todos los casos con la misma inclinación respecto a la carcasa, haciéndola coincidir con el ángulo de inclinación de 9° de las caras laterales.

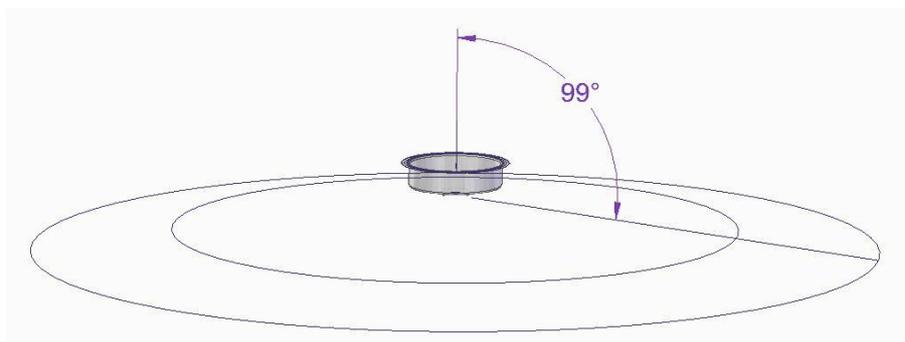


Figura 5-27. Posicionamiento de los 'Far Fiel SPL' empleados.

Los resultados obtenidos muestran que la atenuación producida en el medio se puede aproximar a una disminución de 5-6 dB cada vez que se dobla la distancia de medición, coincidiendo con las aproximaciones que se suelen realizar en acústica a la hora de calcular la atenuación en medios como el agua o el aire.

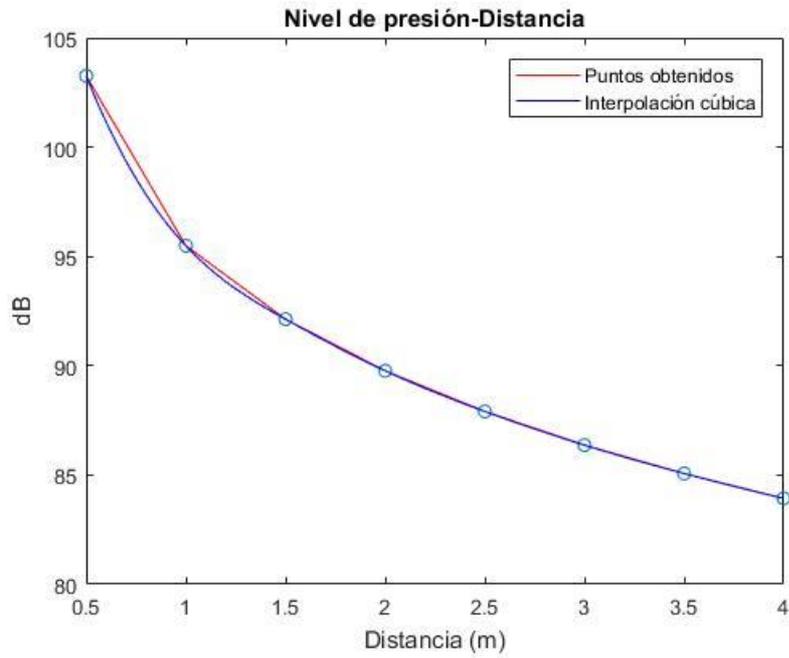


Figura 5-28. Atenuación del nivel de presión con la distancia.

6 FABRICACIÓN

Algunas de las consideraciones realizadas en este apartado ya se han expuesto con anterioridad, sin embargo, en esta parte se presentan de manera más detallada las valoraciones sobre los distintos métodos de fabricación aplicados a la carcasa en estudio.

Uno de los aspectos importantes a considerar en este proyecto, y sobre todo en el caso de la solución con los emisores en el interior de la carcasa, es el estado de la superficie de contacto, ya que la densidad de asperezas en ellas afecta negativamente a la energía transferida. Aunque en un principio se podría pensar que al ser las fuerzas y los desplazamientos pequeños estas fuerzas serían despreciables, la energía transmitida por los emisores también es pequeña, por lo que las fuerzas de fricción han de reducirse al máximo. Por otra parte, hay que tener en cuenta que, al emplear un adhesivo para unir ambas piezas, se produce un aumento del coeficiente de fricción debido a la interacción entre las superficies, además, si la distancia entre asperezas disminuye, se producirá una pérdida de adhesión y un aumento de las pérdidas histeréticas. [1]

Por ello es necesario un método de fabricación que produzca superficies lisas sin la necesidad de un mecanizado posterior. Se analizan varias alternativas, entre ellas la fundición, la impresión 3D y el conformado de chapa.

La fundición es el proceso más económico y versátil, sin embargo, requiere de espesores de pared gruesos (al menos 3 mm) lo que conlleva un aumento de peso y por lo tanto la pérdida de flotabilidad. Por otra parte, la calidad superficial y dimensional proporcionada mediante este proceso es bastante pobre, lo que dificultaría, entre otros aspectos, el comportamiento de la junta y de los tornillos si no se realiza un mecanizado posterior. Por último, la calidad superficial obtenida no sería la requerida, por lo que sería necesario otro proceso de mecanizado para obtener la calidad deseada. Esto nos lleva a descartar este procedimiento como método de fabricación.

Por otra parte, la impresión 3D es un proceso de fabricación relativamente nuevo que presenta algunas características muy ventajosas para este proyecto. En primer lugar, es un método de fabricación muy versátil, por lo que cualquier variación en el diseño, apenas afectaría a su coste. Por otra parte, al ser un método de fabricación aditiva, no es necesario emplear ningún tipo de utillaje, reduciendo en gran medida el precio de fabricación. Sin embargo, y debido a la forma del dispositivo, sería necesario emplear el procedimiento SLS (más caro), ya que el resto de tecnologías como la de modelado por deposición fundida, requieren de soportes para garantizar la estabilidad del elemento durante su fabricación, ralentizando el proceso y encareciendo su precio. Además, debido a la forma de depositar material con este procedimiento, capa tras capa, la calidad dimensional del mismo no sería la adecuada, lo que conllevaría la necesidad de un mecanizado, por lo que este método también ha sido descartado.

El conformado de chapa es un método relativamente sencillo y muy empleado en la industria. Con este procedimiento sólo se necesitaría dar la forma adecuada a una plancha de aluminio de 1 mm de espesor, obteniendo como resultado una carcasa con una buena calidad superficial y dimensional, por lo que no sería necesario realizar un mecanizado posterior. Sin embargo, este procedimiento requiere de un utillaje específico para cada diseño, luego su versatilidad es reducida. Además, este utillaje es muy costoso, por lo que no es el más adecuado para volúmenes de producción bajos. Aunque presenta varias desventajas, este método es el más apropiado para la fabricación de los dispositivos expuestos en el proyecto.

Por último, el empleo de este método requiere que la forma final cuente con radios de acuerdo ya que no se pueden conseguir aristas vivas con este procedimiento debido a las tensiones que se generarían en estas zonas. Por ello, la forma final del prototipo que emplea prensaestopas no sería la expuesta con anterioridad sino una que cuente con radios de acuerdo, como se muestra en la siguiente figura.



Figura 6-1. Forma final del modelo expuesto en el apartado 4.

7 PRESUPUESTO

Como ya se ha comentado, el procedimiento más adecuado para la fabricación es el conformado de chapa. Para realizar las formas que requiere el dispositivo son necesarias dos embuticiones, una para la zona cilíndrica y la junta, y otra para la zona del cajetín, además de una serie de cortes para realizar los orificios en las distintas partes del dispositivo.

En el presupuesto se incluyen también el resto de elementos que se necesitan para la fabricación de la carcasa, como son la junta, los tornillos y los prensaestopas.

El presupuesto aproximado para la realización del conformado es llevado a cabo por la empresa LOBECOR y se expone en la siguiente tabla:

Tabla 7-1. Presupuesto de fabricación

| | Precio |
|-------------------------------------------------|--------|
| Utillaje para embutición 1 | 5000 € |
| Utillaje para embutición 2 | 5000 € |
| Coste de operación por pieza (incluyendo corte) | 13 € |

Como se puede apreciar, aunque el coste de cada pieza es razonable, es necesaria una alta inversión inicial para la realización del utillaje necesario, lo que no es del todo adecuado para la realización de un pequeño número de piezas como en este caso. Por otra parte, una vez realizada la inversión, se puede disponer de este utillaje en cualquier momento para fabricar nuevos dispositivos en el futuro.

En cuanto al coste del resto de elementos, la junta de estanqueidad de la zona superior es suministrada por la empresa JUNTEC mientras que para los prensaestopas se ha contactado con la empresa DEL VALLE. En la siguiente tabla se recoge el precio de estos elementos, así como el precio aproximado de los tornillos que fijan ambas partes.

Tabla 7-2. Presupuesto del resto de elementos

| | Precio |
|--------------------------|-----------|
| Junta superior (JUNTEC) | 4.16 €/ud |
| Prensaestopas (DELVALLE) | 2 €/ud |
| Tornillos | 0.07 €/ud |

Con esta información se determina que una vez realizada la inversión inicial de 10000 €, el precio unitario por dispositivo es de aproximadamente 28 € en el caso del diseño que emplea prensaestopas para los emisores, y

de 20 € en el caso de que se utilicen los emisores en el interior del dispositivo, sin tener en cuenta el precio del adhesivo que éste puede oscilar en función del tipo seleccionado.

En algunos casos puede ocurrir que la empresa encargada de la fabricación sólo realice las operaciones de embutición, siendo necesario entonces incluir el precio de la chapa de aluminio a emplear. Para calcular el área de chapa necesaria sería razonable pensar que coincide con el radio de mayor tamaño de la zona superior, sin embargo, el radio del disco necesario es mayor debido a las deformaciones producidas durante el proceso. El diámetro necesario se obtiene mediante la siguiente expresión: [11]

$$D = \sqrt{d_2^2 + 4(d_1h_1 + d_2h_2)} \quad (7-1)$$

Siendo d y h los diámetros y las alturas de las diferentes embuticiones correspondiendo el subíndice 1 a la embutición del cajetín y el subíndice 2 a la embutición del flotador. Como la forma del cajetín no es circular, se ha supuesto un diámetro de 120 mm que coincide con el de la circunferencia interior del cuadrado de embutición, obteniéndose un diámetro del disco de 522 mm y un precio de la chapa por cada carcasa de aproximadamente 9 €.

CONCLUSIONES

En el proyecto se ha analizado el problema propuesto por la empresa desde dos puntos de vista. En el primero, la solución se aborda desde un plano meramente mecánico, solucionando los problemas más acuciantes del anterior dispositivo y sin entrar a valorar la emisión de ultrasonidos ya que ésta se lleva a cabo mediante dispositivos independientes ya probados, dando lugar al diseño expuesto en el apartado 5. Por otra parte, y aunque esta solución es funcional, el problema también se ha analizado desde el punto de vista acústico mejorando la estanqueidad al colocar los emisores en el interior de la carcasa, evitando de esta forma potenciales filtraciones por los orificios de los emisores y consiguiendo, aunque de forma atenuada, la emisión de ultrasonidos.

Ambas propuestas cumplen la función requerida, aunque es necesaria la valoración de la empresa respecto al nivel de atenuación de la segunda opción, ya que en este proyecto no se ha estudiado el problema de eutrofización como tal, sino los requisitos estructurales propuestos. Pese a que esta alternativa disminuye la probabilidad de fallo respecto a la anterior, es necesario determinar si con este nivel de presión se cumplen los requisitos necesarios para su correcto funcionamiento.

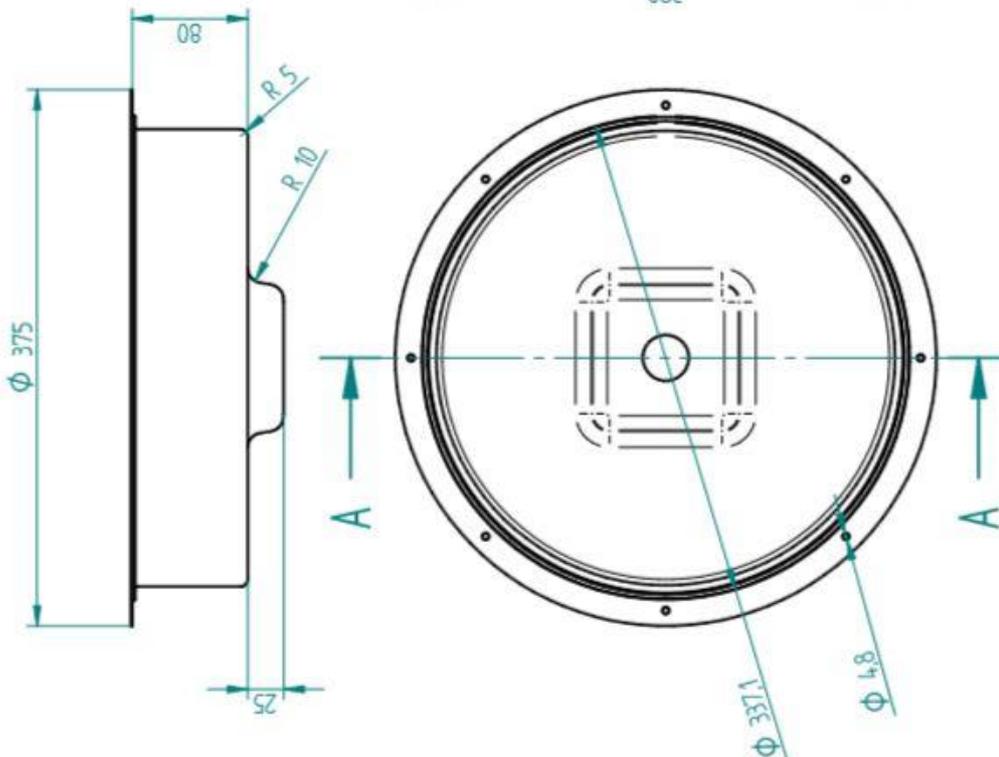
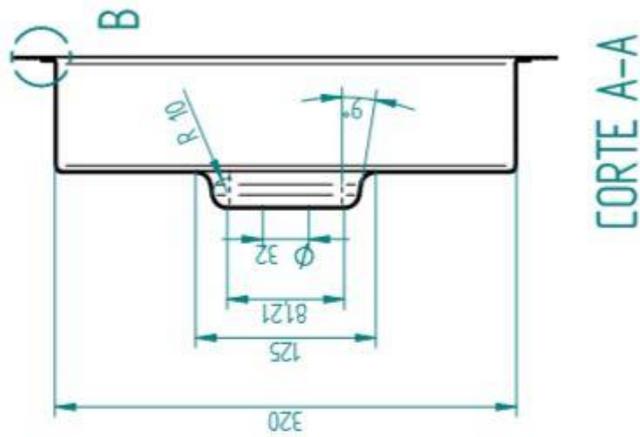
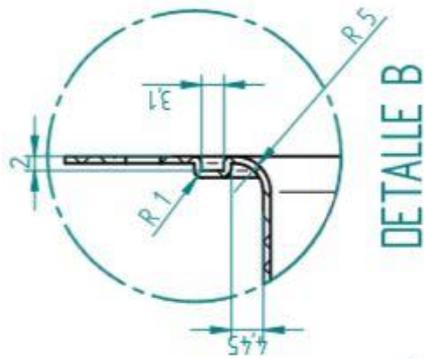
Por otra parte, respecto a la fabricación, las dos soluciones requieren por diseño el proceso de conformado de chapa, ya que es el único por el que se pueden conseguir las formas y los espesores necesarios en aluminio. Este método proporciona buenas características dimensionales, pero requiere de una contundente inversión inicial para su realización, lo que puede no ser lo más conveniente para una producción pequeña, pero es el método que asegura el correcto funcionamiento del dispositivo estudiado.

Por último, cabe considerar las limitaciones existentes durante este estudio, siendo algunas de las más importantes las surgidas de la utilización de programas de uso académico que impiden optimizar el modelo y por lo tanto obtener sólo unos resultados aproximados. Sin embargo, y aunque sería necesario la confirmación de estos resultados, las ideas y consideraciones expuestas en este proyecto pueden conformar un buen punto de partida para siguientes investigaciones.

BIBLIOGRAFÍA

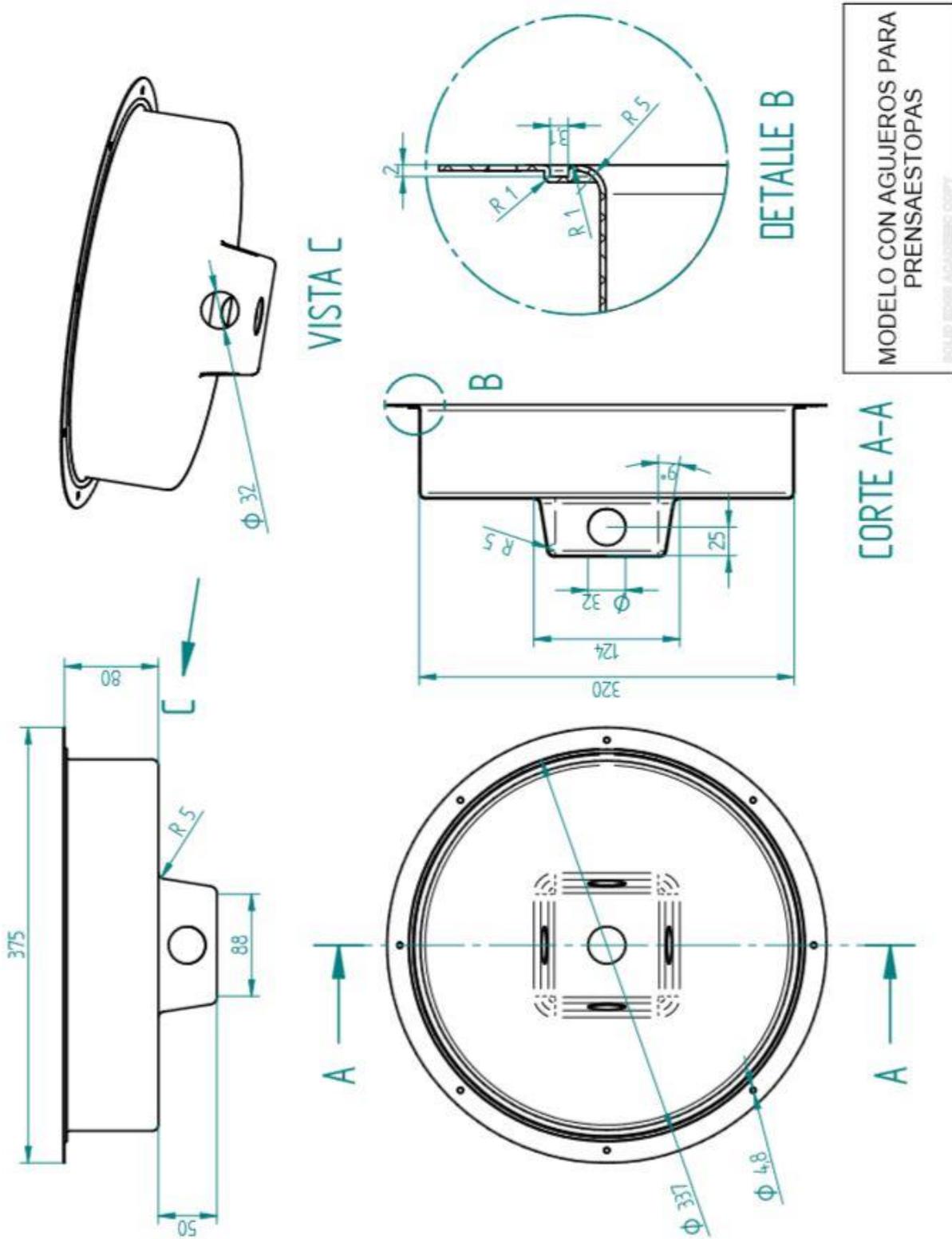
- [1] Hans Irschik, Alexander Belyaev. *Dynamics and Control of Advanced Structures and Machines*, Springer, 2009.
- [2] Luis Francisco Caminos Gámez. *Estudio de la Influencia de Parámetros en el Modelado Numérico del Comportamiento del Oído Medio y Externo Humano*.
- [3] Erdogan Madenci, Ibrahim Guven. *The Finite Element Method and Applications in Engineering using Ansys*, Springer, 2006.
- [4] Arianna Guardiola Villora. *Diseño y Cálculo de Uniones con Tornillos no Pretensados*, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valencia.
- [5] David H. Johnson. *Principles of Simulating Contact Between Parts using Ansys*, 2001.
- [6] Aurelio Marín Aranzana. *Implementación en Matlab de Métodos de N Grados de Libertad para Realizar Análisis Modal Experimental de Estructuras*, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla, 2017.
- [7] Boris L. Guerrero B. *Equilibrio de los Cuerpos Flotantes*, Humboldt Marine Training, 2011.
- [8] Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. *NTP 364: Prevención de fugas en instalaciones: Juntas de estanqueidad*, 1992.
- [9] Trelleborg. *Manual de Juntas Tóricas*.
- [10] Epidor. *Juntas de Estanqueidad Estática*.
- [11] Raquel Serrano Lladó. *Conformado de Chapa*, Universidad de Málaga.
- [12] Alain Giraudeau, Fabrice Pierron. *Identification of stiffness and damping properties of thin isotropic vibrating plates using the virtual fields method: theory and simulations*, Elsevier, 2004.
- [13] Maestre Valero, J.F; Martín-Álvarez, V; Soto-García, M; Pedrero-Salcedo, F. *Ultrasonidos para el Control de Algas en Aguas Regeneradas Almacenadas en Balsas de Riego*. Universidad Politécnica de Cartagena, Murcia, 2016.
- [14] *Sound Pressure Level*. En Wikipedia, versión en inglés.
- [15] ANSYS, *Harmonic Vibrations and Acoustics*. Recuperado de: <https://www.ansys.com/products/structures/vibrations/harmonic-vibrations-and-acoustics>

ANEXO A. PLANOS



MODELO 9 CON ZONA DE LA JUNTA
MEJORADA

SOLID EDGE ACADEMIC COPY



MODELO CON AGUJEROS PARA
PRENSAESTOPAS
AGUJEROS PARA ESTOPAS

