



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería en Diseño Industrial y Desarrollo del Producto**

# **Propuesta de comercialización de maqueta multidireccional para prácticas de vibraciones**

**Autor: Caselles Hernández, David**

**Tutores: Lorenzana Ibán, Antolín**

**Magdaleno González, Álvaro**

**Departamento: Construcciones Arquitectónicas, Ingeniería del Terreno y  
Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras.**

**Valladolid, junio 2021**



## **RESUMEN**

En este trabajo de fin de grado se desarrolla el proceso de diseño de una estructura a escala de un edificio alto, al cual se le aplican disipadores pendulares para su uso en el estudio de amortiguación de oscilaciones en estructuras altas.

Debido a los fines experimentales del equipo, se ha buscado que sus piezas se puedan combinar dando lugar al mayor número de escenarios posibles.

El usuario de la maqueta podrá decidir variables como: cuál es el número de pisos, qué altura tiene cada piso, qué restricciones se le aplican, cuántos disipadores pendulares se colocan y de qué tipo se utilizan.

El objetivo final de este proyecto es obtener un producto de buena calidad, atractivo, didáctico y de bajo coste.

**Palabras clave:** Diseño, Estructura, Vibraciones, Amortiguamiento, Péndulo.

## **ABSTRACT**

In this end of degree project, it is developed the design process for the scaled down model of the structure of a tall building. The structure includes pendular dissipators that will allow to study the damping of oscillations in tall structures.

Keeping experimental purposes in mind, it has been pursued to also have combinations of pieces when allowed, obtaining the highest number of possible scenarios.

The user will be able to select parameters such as number of floors and their height, restrictions to be applied and number and type of pendular dissipators to place.

The overall goal of this project is to obtain a high quality, attractive, educational and low-cost product.

**Keywords:** Design, Structure, Vibrations, Damping, Pendulum.



## ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	8
ÍNDICE DE TABLAS .....	9
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Objetivos .....	3
1.2 Metodología .....	4
1.3 Antecedentes .....	4
2. ESTUDIO DE MERCADO Y ANTECEDENTES.....	9
2.1 Estudio de mercado y principales competidores .....	9
2.2 Tendencia del mercado, intereses en el futuro. ....	12
2.3 Inconvenientes o mejoras de los productos existentes en el mercado. ....	12
2.4 Análisis de recursos propios y costes. ....	13
2.5 Análisis DAFO.....	14
2.6 Conclusiones del estudio. ....	15
3. FUNDAMENTOS CONCEPTUALES .....	17
3.1 Sistemas estructurales, aproximación mediante una maqueta. ....	17
3.2 Vibración libre. ....	18
3.3 Vibración forzada y resonancia. Corrientes de Foucault.....	18
3.4 Amortiguamiento.....	18
3.4.1 Corrientes de Foucault .....	19
3.5 Sistemas de control de vibraciones. ....	20
3.6 Modelos de amortiguadores del equipo. ....	21
4. CONCEPCIÓN Y DESARROLLO DE LA PROPUESTA: COMPONENTES, PROTOTIPAJE, ENSAYO, INDUSTRIALIZACIÓN Y PACKAGING. ....	27

4.1. Concepción y desarrollo de la propuesta .....	27
4.1.1 Objetivo de la propuesta .....	27
4.1.2 Listado de componentes.....	28
4.1.3 Prototipos y proceso de mejora. ....	34
4.2 Propuesta de industrialización .....	44
4.2.1 Compras y proveedores. ....	44
4.2.2 Subcontratación de tareas.....	45
4.2.3 Equipos y fabricación propia.....	47
4.3 Packaging e instrucciones de montaje.....	48
4.3.1 Presentación del producto, embalaje y empaquetado de los componentes. .	48
4.3.2 Almacenamiento y transporte. ....	51
4.3.3 Ensamblaje del producto. Instrucciones de montaje.....	51
5. CONCLUSIONES y CONSIDERACIONES ADICIONALES.....	59
5.1 Conclusiones .....	59
5.2 Presupuesto y costes de fabricación. ....	59
5.3 Consideraciones medioambientales. ....	61
BIBLIOGRAFÍA .....	63
Anexo - PLANOS DE DESPIECE .....	66



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Rascacielos Taipei 101 [1] .....	2
Figura 2: Péndulo Taipei 101 [1] .....	2
Figura 3: Estructura estudio vibraciones en una dirección [2] .....	5
Figura 4: Maqueta modular edificio multidireccional [3].....	6
Figura 5: Amortiguador de masa activo Quanser [5] .....	10
Figura 6: Productos estudio de vibraciones Edibon [7] .....	11
Figura 7: Efectos Corrientes de Foucault [8] .....	19
Figura 8: Péndulo de aro disipador .....	22
Figura 9: Estructura con péndulo tipo 1 .....	23
Figura 10: Péndulo efecto Corrientes de Foucault .....	24
Figura 11: Estructura con péndulo tipo 2.....	25
Figura 12: Forjado .....	28
Figura 13: Pilar .....	29
Figura 14: Acople rápido .....	29
Figura 15: Soporte péndulo sin brazos.....	30
Figura 16: Soporte péndulo con brazos .....	30
Figura 17: Eje péndulo .....	31
Figura 18: Aro disipador .....	32
Figura 19: Pesos péndulo .....	32
Figura 20: Argolla.....	33
Figura 21: Imán .....	33
Figura 22: Placa de cobre .....	34
Figura 23: Primera propuesta péndulo .....	35
Figura 24: Primer prototipo péndulo .....	35
Figura 25: Segunda propuesta péndulo .....	36
Figura 26: Segundo prototipo péndulo .....	37
Figura 27: Prueba péndulo Corrientes de Foucault 1 .....	38
Figura 28: Prueba péndulo Corrientes de Foucault 2 .....	38
Figura 29: Propuesta péndulo con aro disipador.....	40



Figura 30: Propuesta péndulo con aro disipador y pesos .....	40
Figura 31: Péndulo de fricción sin pesos.....	41
Figura 32: Péndulo de fricción con peso ligero .....	42
Figura 33: Péndulo de fricción con peso medio .....	43
Figura 34: Péndulo de fricción con peso grande .....	43
Figura 35: Logotipo Macoglass [10] .....	46
Figura 36: Logotipo Laser Ebro [11].....	46
Figura 37: Detalle acabado impresión 3D .....	47
Figura 38: Maletín con espuma fresada [12] .....	49
Figura 39: Diseño fresado de espuma .....	50
Figura 40: Packaging de las piezas del equipo .....	50
Figura 41: Disposición de estructura 1 .....	53
Figura 42: Disposición de estructura 2 .....	54
Figura 43: Disposición de estructura 3 .....	55
Figura 44: Disposición de estructura 4 .....	56
Figura 45: Disposición de estructura 5 .....	57

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Análisis DAFO .....	15
Tabla 2: Costes de fabricación .....	60



## 1. INTRODUCCIÓN

La aparición de nuevos materiales en la construcción, más ligeros y resistentes, permitió comenzar a construir edificios cada vez más altos y esbeltos. Este cambio de materiales propició un cambio en las propiedades estructurales de los nuevos edificios.

Las estructuras de estos edificios tienen una gran flexibilidad y ante determinados fenómenos naturales, como son los seísmos o las acciones del viento, presentan una gran falta de amortiguación. Las vibraciones que se transmiten a la estructura disminuirán sus características operativas.

Claro ejemplo de este tipo de estructura es el edificio *Taipei 101*, con 508m de altura. Está situado en una ubicación bastante desfavorable con vientos huracanados de hasta 250 km/h y con un gran número de terremotos.

Tiene un esqueleto estable de acero y hormigón, pero en su construcción se prevé que no es suficiente para evitar desplazamientos y oscilaciones. Ante los efectos de vientos y terremotos, se calcula que la parte superior del edificio oscilaría desplazando lateralmente la cima de la estructura hasta 2,5 m. Debido a estas previsibles oscilaciones y desplazamientos se instaló un amortiguador de vibraciones.

El amortiguador de vibraciones de esta estructura consiste en una bola de acero de 660 toneladas y 5,5 m de diámetro que cuelga de 16 cables de acero entre los pisos 91 y 87. Se calcula que es capaz de contrarrestar los efectos de un terremoto de hasta 7 en la escala Richter y vientos de hasta 450 km/h. [1]



*Figura 1: Rascacielos Taipei 101 [1]*



*Figura 2: Péndulo Taipei 101 [1]*

El funcionamiento de este gran péndulo corresponde al de un amortiguador pasivo. Cuando la estructura del edificio se excita la gran bola se mueve en sentido opuesto al movimiento del edificio y comienza su efecto amortiguador.

Gracias al estudio de las vibraciones en estructuras se han desarrollado dispositivos y estrategias de construcción de modo que los edificios sufran lo menos posible. Cuando la propia construcción no es capaz de amortiguar bien las vibraciones se colocan amortiguadores. Para poder elegir las características del amortiguador en cada caso particular se realizarán diferentes estudios.

El equipo desarrollado en este proyecto servirá para estudiar los efectos de situar amortiguadores pasivos en la parte superior de diferentes estructuras.

## **1.1 Objetivos**

La realización de este proyecto persigue el principal objetivo de desarrollar una maqueta funcional, para uso educacional, con un precio asequible y una calidad que compita con sus rivales en el mercado.

En este caso, la maqueta servirá como dispositivo de estudio de los efectos de amortiguadores de masa pasivos en edificios altos. Se busca la mayor versatilidad y el mayor número de combinaciones posibles de los elementos del equipo. De este modo el usuario podrá simular lo más fielmente posible la situación que desee.

El objetivo final de este tipo de proyectos es hacer llegar la experimentación y el estudio de estructuras al mayor número de estudiantes posible. Es de gran importancia poder reforzar los conceptos teóricos aprendidos con experiencias y estudios.

## **1.2 Metodología**

Este trabajo se desarrolla en diferentes capítulos que reflejan las etapas del proceso que ha tenido su elaboración:

- 1- Estudio de mercado y antecedentes, en el que se desarrolla el estudio propio y de la competencia para encontrar un lugar en el mercado. Todo esto con la ayuda de los trabajos de antiguos compañeros.
- 2- Fundamentos conceptuales, donde se describe la teoría sobre la que se sustenta el proyecto y que explica los fenómenos que ocurren durante su uso.
- 3- Concepción y desarrollo de la propuesta, que describe el proceso creativo, experimental y de mejora continua que se ha llevado a cabo.
- 4- Propuesta de industrialización, en la que se indica quién y cómo se van a realizar las diferentes piezas que componen el equipo.
- 5- Packaging e instrucciones de montaje, donde se describe la apariencia final del producto de cara al público y una breve guía recomendada de montaje.
- 6- Conclusiones y consideraciones finales, que describen el grado de consecución de los objetivos planteados en el inicio del proyecto.

## **1.3 Antecedentes**

El desarrollo de este producto se ha sustentado en la experiencia y trabajo de antiguos compañeros que han desarrollado modelos y estructuras similares.

En la creación de estos modelos se ha buscado obtener unas propiedades físicas y mecánicas parecidas a las de la estructura real que simulan. En el caso de este proyecto, la maqueta simula una estructura de un edificio alto y esbelto.

A continuación, se analizan diferentes ventajas y desventajas de dos maquetas cuyas estructuras se asemejan a la de este proyecto.

Los dos modelos propuestos por antiguos compañeros son los siguientes:

- Estructura para estudio de vibraciones en una sola dirección (Figura 3) [2].

En este caso se trata de dos módulos intercambiables con el movimiento impedido en todas las direcciones excepto movimientos laterales. Los módulos están formados por diferentes elementos: metacrilato fresado para simular los forjados, chapa metálica para simular los pilares y refuerzos de chapa en las uniones de los módulos.



*Figura 3: Estructura estudio vibraciones en una dirección [2]*

Los puntos positivos del proyecto que han servido de referencia son: el pequeño número de componentes, la elección de materiales apropiada y la posibilidad de realizar algunas combinaciones con módulos existentes.

Los aspectos negativos de este proyecto son: la escasez de posibilidades de combinación de los diferentes elementos para generar nuevos casos de estudio; y la inviabilidad de analizar movimientos en varias direcciones, limitando así las experiencias a desplazamientos laterales.

- Maqueta modular de un edificio multidireccional (Figura 4) [3].



*Figura 4: Maqueta modular edificio multidireccional [3]*



Esta maqueta se realiza posteriormente, ya que aprovecha el concepto del metacrilato como forjado y en cambio utiliza varillas metálicas como pilares de la estructura. Mantiene un diseño modular con la diferencia de que permite el movimiento en todas las direcciones y un ajuste en la altura de los forjados de la estructura.

Este diseño alcanza una mayor simplicidad de sus componentes ya que no necesita piezas para reforzar las uniones de sus módulos; esto se consigue aprovechando los taladros del metacrilato para unirlos utilizando las varillas.

El principal punto negativo de este diseño es su nula capacidad para restringir movimientos de la estructura. El montaje y desmontaje del equipo no resulta práctico, esto también será un punto a mejorar.

En este proyecto se mejoran algunas características como la facilidad de montaje y la versatilidad. De modo que se pueda limitar movimientos en alguna dirección para aumentar los casos de estudio posibles y que existan numerosas posibilidades de combinación de sus elementos.



## 2. ESTUDIO DE MERCADO Y ANTECEDENTES

### 2.1 Estudio de mercado y principales competidores

Servirá para analizar la competencia y predecir la respuesta de los clientes ante la salida del producto al mercado.

Primero se conoce la situación actual del mercado a través de los principales competidores y el público objetivo del producto.

Los principales competidores son:

1- *Quanser*, fundada en 1989 respondiendo a la necesidad de plataformas de hardware de escritorio optimizadas para la enseñanza e investigación en el ámbito de la ingeniería.

“*Quanser* es ahora el líder mundial en el diseño y fabricación de productos refinados, soluciones y laboratorios completos que han transformado la forma en que los educadores enseñan la teoría, aplicación e implementación de controles, robótica y mecatrónica. [4]”

Tiene un enfoque de innovación, colaboración y educación que le ha llevado a lograr una serie de innovaciones tecnológicas a lo largo del tiempo. Del mismo modo ha conseguido convencer a más de 2500 universidades e instituciones de que *Quanser* es el mejor en la producción de equipos de laboratorio.

Existe una división de sus productos dedicada a la ingeniería de seísmos, el producto más similar al de este proyecto es un amortiguador de masa activo que funciona sobre una estructura modular.

Es muy similar a la maqueta realizada por uno de mis antiguos compañeros (Fig 3), añadiendo un amortiguador de masa activo. Las partes que forman cada uno de sus módulos son; forjados de plástico, chapas laterales de aluminio flexible, piezas laterales de plástico para la fijación del amortiguador

y el propio amortiguador, que a su vez está formado por un carro impulsado por un motor de CC a través de un mecanismo de piñón y cremallera.

A continuación, se encuentra la imagen del producto en su web, un detalle a tener en cuenta es la ausencia del precio y su venta bajo presupuesto (Figura 5) [5].



Figura 5: Amortiguador de masa activo Quanser [5]

Ventajas y desventajas de este producto respecto al propuesto.

Ventajas:

- Buena reputación e imagen de la marca.
- Amortiguador controlable que puede resultar más atractivo para algunas titulaciones y formaciones relacionadas con la electrónica.

## Desventajas:

- Sólo permite el estudio de vibraciones en una única dirección, tanto por su estructura como por el sistema de movimiento del amortiguador.
- El precio es muy elevado debido a la exclusividad de estos productos.
- Tiene un montaje bastante complicado ya que necesita un gran número de elementos de fijación.

2- *Edibon*, algo más longeva que *Quanser*, con 40 años de experiencia, es referente en equipamiento didáctico para ingeniería y educación técnica. Gracias a su estrategia basada en I+D+I hoy cuentan con más de 4000 productos de desarrollo y diseño propios [6].

Tiene una gran variedad de productos, entre los cuales se encuentra la división de vibraciones y oscilaciones, donde existen varios productos que podrían ser competencia directa del equipo desarrollado en este proyecto (Figura 6) [7].



**MVLFF**

**Equipo de Vibraciones Libres y Forzadas**

El Equipo de Vibraciones Libres y Forzadas, "MVLFF", ha sido desarrollado para ampliar el campo de demostraciones y experimentos que proporcionan al usuario una comprensión de las vibraciones libres y forzadas de un sistema muelle-masa-amortiguador...

**MEVLB**

**Equipo de Estudio de Vibración Libre en Barras**

El Equipo de Estudio de Vibración Libre en Barras, "MEVLB", permite estudiar las características de las vibraciones libres de una barra de flexión. La frecuencia natural de la barra de flexión se puede modificar añadiendo pesos adicionales en el...

*Figura 6: Productos estudio de vibraciones Edibon [7]*

Ventajas y desventajas de este producto respecto al propuesto.

Ventajas:

- Buena reputación e imagen de la marca.
- Equipos específicos para cada estudio o aplicación. Especialización.

Desventajas:

- No existe un producto para el estudio de vibraciones específico para estructuras altas de varios módulos.
- Equipos complejos con un gran número de piezas, dificulta el montaje.
- Precio muy elevado debido a la exclusividad del producto.

## **2.2 Tendencia del mercado, intereses en el futuro.**

Gracias a herramientas de venta online como Amazon y a los diferentes medios para llegar al público objetivo como las redes sociales y la publicidad, los productos encuentran un mayor número de competidores.

Las empresas del sector trabajan bajo presupuesto, es decir, no ofrecen un precio al público de sus productos; de este modo consiguen captar la atención de compradores potenciales que habrían descartado sus productos sin pararse a ver sus características únicamente por su elevado precio.

El mercado debería ser, paulatinamente, más competitivo y transparente en este sector; de modo que la gran mayoría de centros educativos puedan tener en un futuro acceso a estos equipos por un precio razonable.

El sistema educativo también está evolucionando hacia una educación práctica y de aplicación de la teoría, de modo que el público interesado va en aumento.

## **2.3 Inconvenientes o mejoras de los productos existentes en el mercado.**

Conociendo los productos de los principales competidores y los antiguos trabajos de compañeros, se llega a las siguientes conclusiones:

- Los equipos tienen poca versatilidad, están diseñados para objetivos muy concretos que no permiten algunas posibles combinaciones interesantes.  
Se propone una estructura que permita decidir sus grados de libertad y el número de amortiguadores que se utilizan en cada experiencia.
- Los equipos son muy caros y exclusivos.  
Se propone un diseño con materiales y tecnologías que permitan abaratar el coste para obtener un producto más accesible.
- Los equipos tienen un montaje y desmontaje complicado.  
Se propone una estructura con facilidades en el acoplamiento de los elementos, agilizando el montaje de las diferentes combinaciones.

#### **2.4 Análisis de recursos propios y costes.**

Los costes derivados de la fabricación del equipo serán:

- Compra de materiales, tanto materias primas como elementos ya listos para su ensamblaje (material para impresora 3D, tornillería, planchas de metacrilato, tuercas...)
- Subcontratación de las operaciones que resultan difíciles o imposibles con las instalaciones disponibles (fresado, corte láser...)
- Mano de obra del remate de algunas piezas y del embalaje del producto.
- Coste del envío y de la puesta en venta del producto.

Respecto a recursos propios, se dispone de una impresora 3D que facilita la obtención de piezas de difícil elaboración. Estas piezas mediante otros métodos de

fabricación como el torneado, serían significativamente más caras y aumentarían la dificultad del montaje.

Las instalaciones de la Universidad de Valladolid se plantean como escenario para el remate y ensamblaje del producto final.

## **2.5 Análisis DAFO**

Es una herramienta para analizar la situación de una empresa o proyecto; atendiendo a los factores, tanto internos como externos, que perjudican el desarrollo y venta del producto final. Se puede dividir en dos partes:

Análisis interno: en el que se analiza las fortalezas y debilidades del proyecto, a priori la parte más fácil del estudio siempre que se sea sincero y objetivo.

Las fortalezas tendrán que reflejar los aspectos que otorgan una ventaja comparativa.

Las debilidades deberán detectar los frenos que evitan que el proyecto progrese de forma óptima.

Análisis externo: en el que se analiza y comprende el mercado al que se accede para encontrar un hueco y encajar en él.

Las amenazas ponen en riesgo la posición del producto en el mercado y no dependen de la propia empresa. No se pueden eliminar directamente, pero se podrán elaborar estrategias para minimizar sus efectos.

Las oportunidades son los aspectos positivos del entorno que se utilizarán para crecer y encontrar un espacio en el mercado.



	ANÁLISIS INTERNO	ANÁLISIS EXTERNO
<b>NEGATIVOS</b>	<b>DEBILIDADES</b>	<b>AMENAZAS</b>
	Dificultades en la gestión de los recursos	Posible entrada de nuevos competidores
	Presupuesto limitado	Descenso de la demanda
	Falta de experiencia en el sector	Aparición de nuevos equipos mejorados o sustitutivos
<b>POSITIVOS</b>	<b>FORTALEZAS</b>	<b>OPORTUNIDADES</b>
	Producto mejorado y accesible	Auge del mercado on-line
	Equipo con formación en la fabricación y diseño de estructuras	Previsión de un aumento de la demanda
	Especialización en un solo producto.	Mayor acercamiento al público objetivo, Big Data

*Tabla 1: Análisis DAFO*

## 2.6 Conclusiones del estudio.

Gracias a las nuevas oportunidades que presenta el comercio online y las nuevas tecnologías de marketing, se producirá un acercamiento a un público objetivo. El público objetivo busca un producto de precio razonable, versátil, de fácil montaje y

de fácil uso educativo. La imagen del producto final deberá mostrar una calidad y precio adecuados para ser competitivos en el mercado.

Se tendrá que optimizar el proceso de fabricación y ajustar el precio con proveedores y empresas subcontratadas para alcanzar un buen nivel de competitividad.

### **3. FUNDAMENTOS CONCEPTUALES**

#### **3.1 Sistemas estructurales, aproximación mediante una maqueta.**

Las estructuras de las diferentes edificaciones deben de cumplir unos requisitos fundamentales, entre los que se encuentran:

- El equilibrio: estado en el que se encontrará el edificio cuando todas sus fuerzas se igualen a 0.
- La estabilidad: Cuando una fuerza externa genere desplazamientos en la estructura, el edificio debe absorber esa energía de modo que no suponga ningún riesgo para su estructura.
- La resistencia: Capacidad de la estructura de soportar cargas sin fallar.
- Funcionalidad, estética y economía: Factores que influyen notablemente en el diseño de la estructura que cumpla con los tres anteriores requisitos.

Con el equipo desarrollado se podrán simular diferentes disposiciones de los elementos estructurales, que junto con los péndulos mitigarán los desplazamientos generados por agentes externos en las diferentes experiencias.

Los elementos de la maqueta que permitirán generar una estructura son los forjados y los pilares. Gracias al sistema de acoples de la maqueta, se podrán situar barras diagonales de modo que restrinjan el movimiento en algunas direcciones. Los forjados se podrán acoplar a los pilares a la altura que se desee. Gracias a estos componentes se podrán formar numerosas estructuras para los diferentes ensayos.

Se podrá comprobar si se cumple el requisito de estabilidad de una estructura ideada, ofreciendo la posibilidad de simular diferentes situaciones con diferentes péndulos. Gracias a esto se podrá ajustar el diseño definitivo de la estructura.

### **3.2 Vibración libre.**

La vibración es una oscilación mecánica en torno a una posición de referencia. Una vibración libre se produce cuando se desplaza una masa una distancia y se deja oscilar libremente, esto ocurre con excitaciones tipo impulso [8].

En el caso de ser amortiguada, por fricción con el aire en general en los sistemas reales, la oscilación producida va perdiendo energía con el tiempo debido a su disipación. La energía termina siendo 0 y la masa se detiene. Una buena amortiguación ayudará a disminuir el tiempo y la intensidad de las vibraciones.

### **3.3 Vibración forzada y resonancia. Corrientes de Foucault**

Aparece cuando se aplica a un sistema una fuerza periódica, ya sea interna, como por ejemplo sucede con una rotación descompensada en una máquina, o externa, con movimientos sísmicos en el caso de los terremotos.

Estas vibraciones pueden ser muy peligrosas si su frecuencia angular coincide con la natural del elemento que vibra, ya que en ausencia de amortiguación la amplitud se hace infinita, este fenómeno se conoce como resonancia.

La amplitud de un sistema en resonancia puede tomar valores muy grandes incluso para fuerzas muy pequeñas y aparentemente inofensivas. Este fenómeno podría colaborar en el colapso y en la generación de defectos de una estructura, por lo que habrá que evitarlo con una buena amortiguación.

### **3.4 Amortiguamiento.**

El amortiguamiento se puede definir como la disminución de intensidad progresiva de un fenómeno periódico, es decir, la pérdida de energía de un sistema vibratorio.

Las limitaciones del amortiguamiento estructural se deben a la capacidad de disipación de energía de los materiales de construcción, además, el amortiguamiento generado por la interacción suelo-estructura tiene una limitada contribución.

La solución empleada en la actualidad en edificios altos es la utilización de varios amortiguadores mecánicos; de modo que resulta interesante su estudio e integración en diferentes estructuras.

### 3.4.1 Corrientes de Foucault

Cuando un conductor de electricidad se mueve en un campo magnético o está rodeado por un campo magnético variable en el tiempo, se inducen corrientes en él.

Las corrientes de Foucault son corrientes eléctricas creadas en una masa conductora, en este caso la placa de cobre. Esto puede deberse a la variación en el tiempo de un campo magnético que cruza un medio conductor o a un desplazamiento de una masa conductora en un campo magnético constante, que es el caso de un péndulo de este proyecto.

La dirección de las corrientes de Foucault contrarresta la causa de su formación, de este modo este fenómeno se emplea en el caso de los frenos magnéticos.

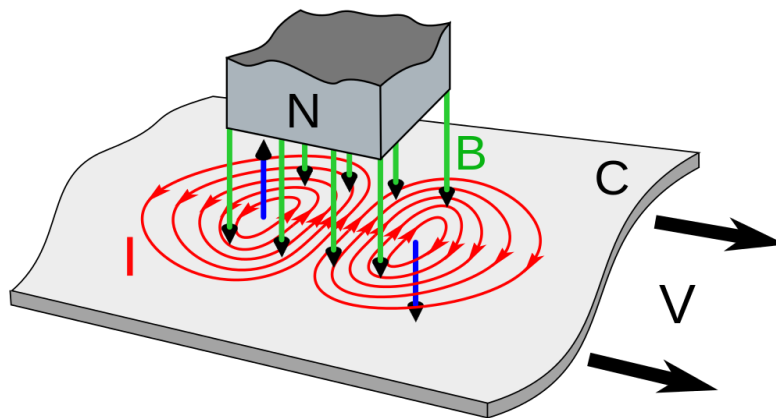


Figura 7: Efectos Corrientes de Foucault [8]

### 3.5 Sistemas de control de vibraciones.

Existen cuatro grandes grupos de sistemas de control de vibraciones o sistemas de protección sísmica [9].

- **Sistemas activos:** Consisten en equipos formados por: sensores situados en la estructura que miden su excitación; sistemas controladores, que calculan a partir de los datos de los sensores la fuerza necesaria para contrarrestar los efectos de la excitación; y actuadores, que ejercen las fuerzas calculadas.
- **Sistemas híbridos:** Combinan sistemas activos y pasivos para una mayor fiabilidad.
- **Sistemas semiactivos:** Similares a los sistemas activos, se diferencian en que el control estructural se obtiene a partir de dispositivos con características mecánicas controlables, lo que permite modificar las propiedades dinámicas de la estructura.
- **Sistemas pasivos:** Los elementos de estos sistemas no son controlables, sólo dependen de las condiciones de trabajo de cada situación. Alteran las propiedades dinámicas del edificio reduciendo las excitaciones de la estructura. Existen diferentes tipos de sistemas pasivos:
  - o **Aisladores de base:** Separan la estructura de los movimientos del suelo, esto se consigue utilizando apoyos especiales que son flexibles en desplazamientos laterales y rígidos en desplazamientos verticales.

Para conseguir estas condiciones hay dos vertientes diferenciadas:

- Apoyos elastoméricos, que utilizan materiales como el caucho o el neopreno reforzados con láminas de acero, de modo que consiguen una elasticidad para permitir flexibilidad en desplazamientos laterales y una rigidez para los desplazamientos verticales.
- Apoyos deslizantes, que tienen una superficie sobre la que se deslizará la estructura disipando la energía por rozamiento.
- Sistemas inerciales acoplados (TMD): Que constan de un oscilador, un mecanismo de muelle y un mecanismo de amortiguamiento. Su mayor desventaja es que se necesita una gran masa y un gran espacio en la parte alta de los edificios para su instalación.
- Disipadores de energía: Que absorben la energía de la estructura reduciendo las deformaciones y el daño estructural. Existen dos tipos: histéricos, que dependen del desplazamiento, la fricción entre superficies y la plastificación de metales; y viscoelásticos que están basados en la velocidad y la conducción de sólidos viscoelásticos a través de orificios.

### **3.6 Modelos de amortiguadores del equipo.**

En el equipo propuesto, se podrán instalar dos amortiguadores diferentes, ambos serán dos sistemas pasivos, de tipo pendular y que comparten un ingenioso soporte omnidireccional que se presentará más adelante.

Los dos amortiguadores del equipo se describen a continuación:

Amortiguador tipo 1, "Péndulo de aro disipador":



*Figura 8: Péndulo de aro disipador*

Este primer amortiguador está basado en un péndulo omnidireccional que transmite las oscilaciones a un aro disipador, que al friccionar sobre el propio soporte de metacrilato disipa energía. El sistema se soporta preferiblemente en la parte alta de la maqueta en uno de los emplazamientos correspondientes de los metacrilatos.

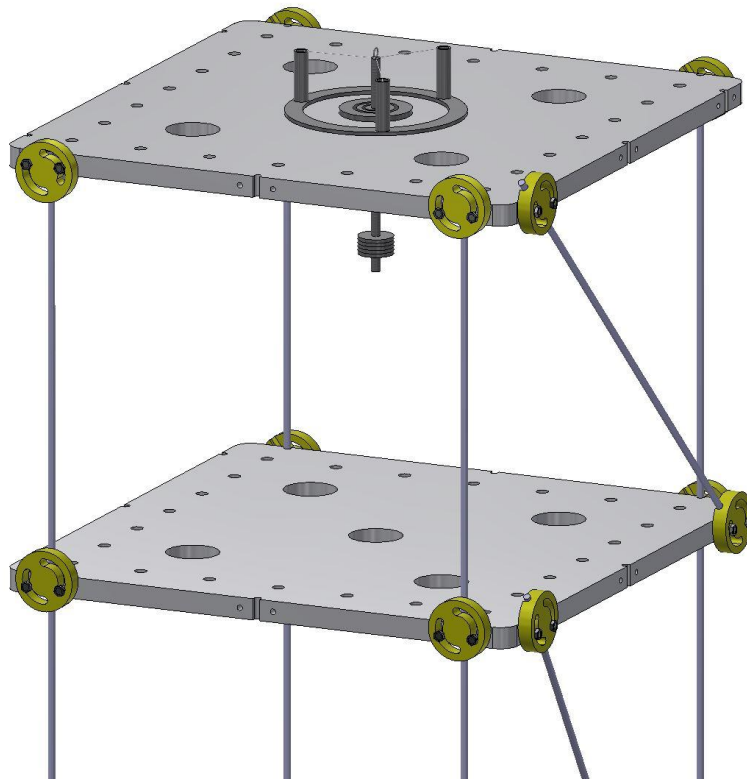
El sistema de amortiguación está formado por varios elementos:

- Soporte del péndulo, con un doble eje tipo giroscopio, que permite el movimiento del péndulo sea cual sea la dirección en la que actúe la excitación de la estructura.
- Aro de disipación, formado por un aro con tres zonas de anclaje, las cuales mediante cables o hilos se unen a la argolla superior del eje.



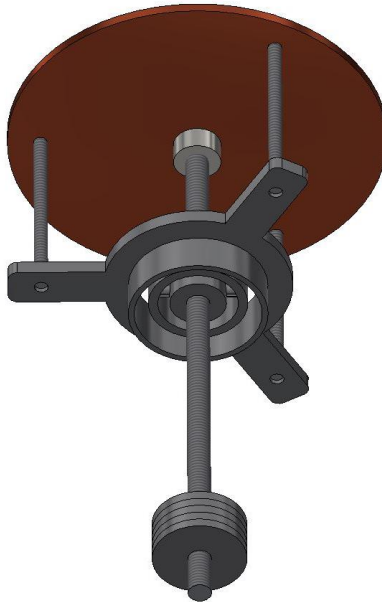
- Zona del peso del péndulo, con altura y peso variable para ajustar en cada experiencia,

Con estos elementos el equipo permite que el movimiento del edificio se transmita al péndulo; el cuál a su vez transmite esa oscilación al aro de disipación, que se encarga, mediante una disipación por rozamiento, de disminuir la oscilación del edificio, realimentando así el sistema y en cierto tiempo eliminando las oscilaciones por completo.



*Figura 9: Estructura con péndulo tipo 1*

Amortiguador tipo 2, “Péndulo efecto Corrientes de Foucault”:



*Figura 10: Péndulo efecto Corrientes de Foucault*

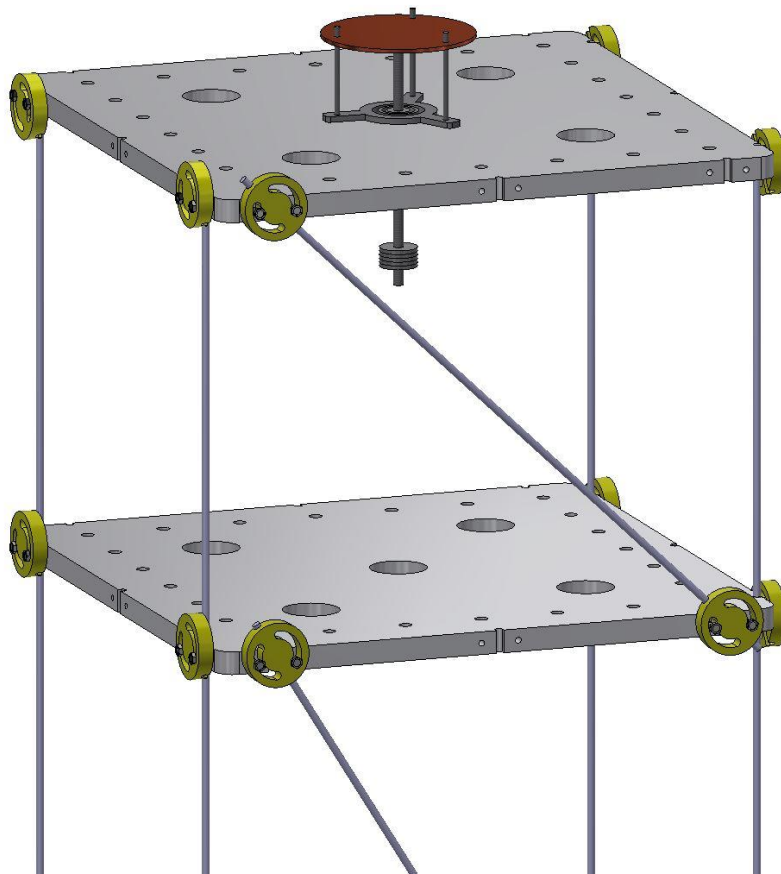
Este segundo amortiguador también está basado en un péndulo omnidireccional, pero en este caso disipa las oscilaciones por la acción de un imán muy próximo a una placa de cobre. El sistema se soportará preferiblemente en la parte alta de la maqueta en uno de los emplazamientos correspondientes de los forjados.

Este sistema de amortiguación está formado por varios elementos:

- Soporte del péndulo, con un doble eje tipo giroscopio, que permite el movimiento del péndulo sea cual sea la dirección en la que actúe la excitación de la estructura. En este caso sirve también de soporte de la placa de cobre.
- Imán y placa de cobre, los cuales funcionarán como disipadores de la energía generada por las oscilaciones.

- Zona del peso del péndulo, con altura y peso variable para ajustar en cada experiencia,

Este péndulo transmite el movimiento del edificio a la pareja imán-cobre que tiende a terminar con el movimiento del péndulo mediante la disipación de la energía debido a la generación de corrientes de Foucault, gracias a esta disipación se consiguen amortiguar las oscilaciones del edificio.



*Figura 11: Estructura con péndulo tipo 2*

Para elaborar los soportes móviles de ambos péndulos se diseña un doble eje, que funciona como rótula y se imprime en un solo sólido. De este modo se genera un soporte omnidireccional.



## **4. CONCEPCIÓN Y DESARROLLO DE LA PROPUESTA: COMPONENTES, PROTOTIPAJE, ENSAYO, INDUSTRIALIZACIÓN Y PACKAGING.**

### **4.1. Concepción y desarrollo de la propuesta**

En este apartado se describen los objetivos que se han perseguido, las piezas que se han utilizado y el prototipado y proceso de mejora que se ha llevado a cabo para alcanzar las soluciones finales.

#### **4.1.1 Objetivo de la propuesta**

Se parte de la intención de realizar una maqueta didáctica fabricable y comercializable con diferentes componentes, basado en un amortiguador de masa pasivo de tipo péndulo.

Las ideas de mejora entorno a la propuesta son, que sea modular, versátil, compacto, didáctico, fácil de montar y económico.

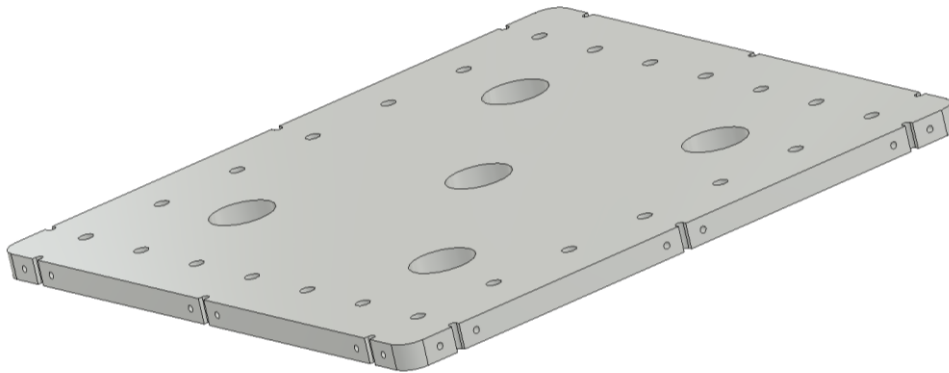
La mejora de la estructura se consigue dotándola de la capacidad de bloquear movimientos en alguna de las direcciones para conseguir diferentes escenarios con el mismo equipo.

La utilización de dos tipos diferentes de disipadores de vibraciones fue una propuesta de mejora de la versatilidad y requirió de varias pruebas hasta llegar al resultado final, esto se analizará más adelante.

A continuación, se analizan los componentes definitivos de la propuesta, comprobando que cumplen con los objetivos propuestos.

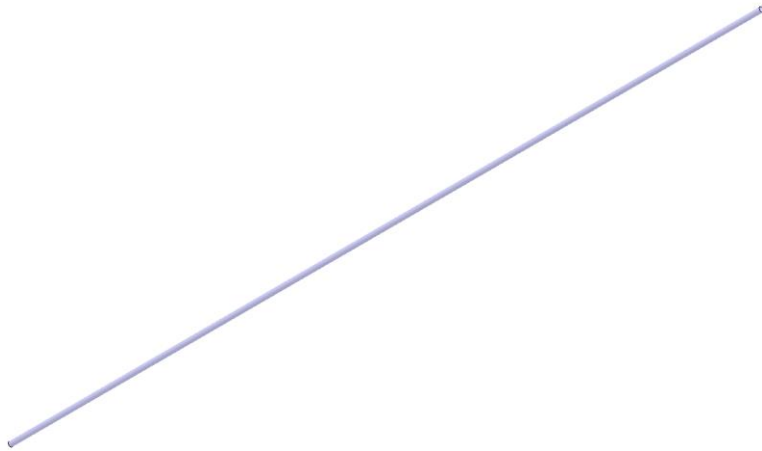
#### 4.1.2 Listado de componentes.

- 1- Forjado: Se fabrica mediante fresado de una lámina de metacrilato, mejora respecto a los anteriores ya que aumenta las posibilidades de montaje añadiendo un acople rápido para los pilares en los laterales. Se añaden también varios emplazamientos para los péndulos de modo que aumenta el número de combinaciones posibles. Por último, se añaden los emplazamientos de los nuevos acoples rápidos para las barras diagonales que impedirán el movimiento en alguna dirección.



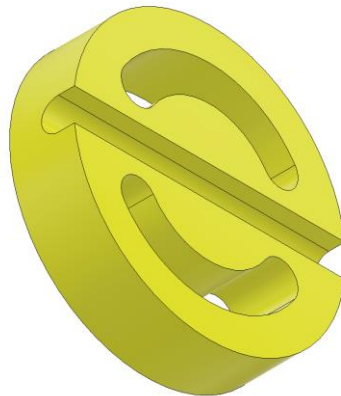
*Figura 12: Forjado*

- 2- Pilares: Varillas de fibra de vidrio cortadas a medida, permiten una gran flexibilidad a la vez que aporta rigidez a la estructura, encajarán tanto en la base como en las piezas de acople rápido. Las diferentes longitudes de estas barras permiten que puedan ser colocadas en diagonal. En el caso de ser colocadas en diagonal actuarán como brazos de arriostamiento lateral, que impedirán el movimiento en esa dirección.



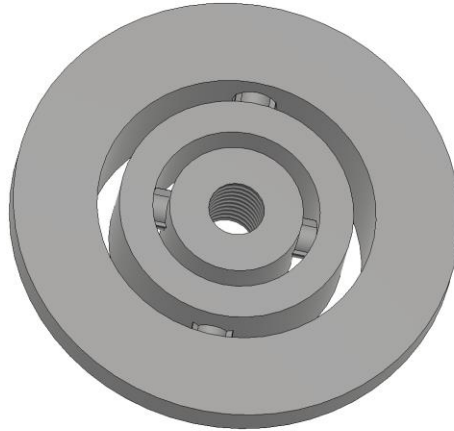
*Figura 13: Pilar*

- 3- Piezas de acople rápido: Se fabrican gracias a la impresión 3D, se colocan en los laterales de los forjados atrapando los pilares y sirviendo de acople para las posibles barras diagonales que se quieran situar para restringir movimientos. Tiene unos arcos rasgados que permiten situar el acople en diferentes ángulos y fijarlo mediante tornillos de forma rápida y sencilla.



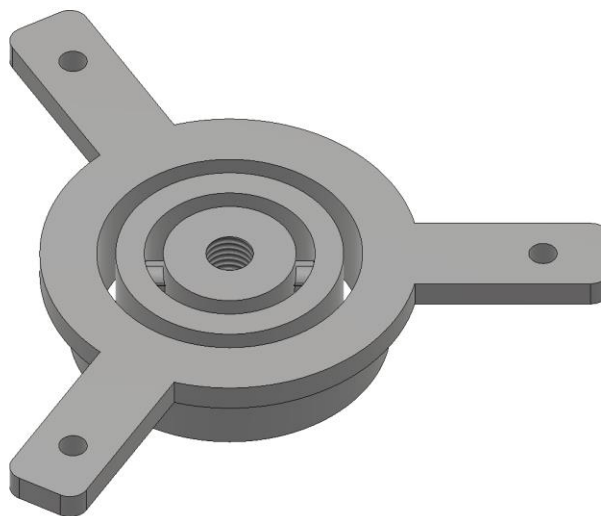
*Figura 14: Acople rápido*

- 4- Soporte péndulo sin brazos: Se fabrica gracias a la impresión 3D, se ubica en los emplazamientos centrales de los forjados y se sitúa el péndulo atravesándolo. Permite el movimiento en todas las direcciones.



*Figura 15: Soporte péndulo sin brazos*

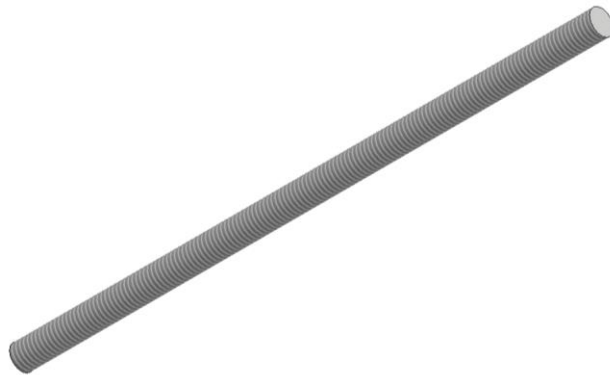
- 5- Soporte péndulo con brazos: Se fabrica gracias a la impresión 3D, se ubica en los emplazamientos centrales de los forjados y se sitúa el péndulo atravesándolo. A diferencia del anterior, tiene tres brazos que sirven de soporte para la placa de cobre.



*Figura 16: Soporte péndulo con brazos*

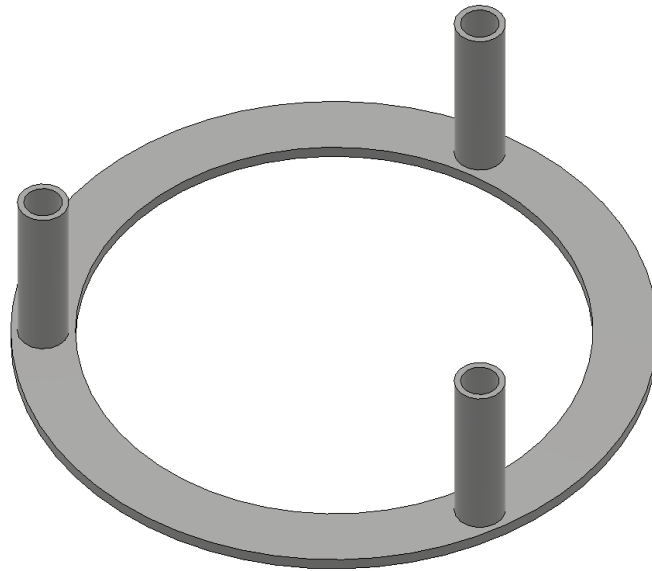


- 6- Varilla péndulo: Varilla de acero inoxidable M5 sobre la que se sitúan los pesos y el soporte tipo giroscopio, que ancla el péndulo a la estructura.
- En el caso del amortiguador tipo 1, se situará en el extremo superior una argolla en la que se anclarán los hilos.
- En el caso del amortiguador tipo 2, se situará en el extremo superior un imán que generará junto con una placa de cobre un amortiguamiento.



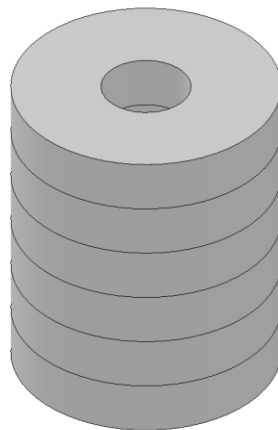
*Figura 17: Eje péndulo*

- 7- Soporte hilos: Es una parte fundamental del péndulo de hilos, el aro inferior se imprime en 3D, cabe la posibilidad de cortar a láser el disco y soldar los tres casquillos correspondientes. Los tres casquillos sirven para anclar y guiar los hilos hasta su unión con la argolla.
- Se introducen unos topes de madera para dejar atrapado el hilo en el interior de los casquillos. Se considera la forma más sencilla de anclar los hilos pero el diseño de esta pieza permite que el hilo atravesase el casquillo y sea atado al propio aro disipador si se desea.



*Figura 18: Aro disipador*

- 8- Pesos eje: Se trata de arandelas con taladro interior de algo más de 5 mm. Se colocan varias arandelas para conseguir el peso deseado. El espesor máximo de las arandelas será el mismo que el diámetro del agujero interior.



*Figura 19: Pesos péndulo*

- 9- Argolla: En la que se anclarán los hilos del aro de fricción del péndulo tipo 1, irá roscada en la parte superior de la varilla.



*Figura 20: Argolla*

- 10- Imán: Se fija en la parte superior del péndulo basado en las corrientes de Foucault. Tendrá que montarse a una distancia adecuada para que se genere este efecto. Cuanto más cerca se sitúen el imán y la placa de cobre, mayor amortiguamiento serán capaces de generar.



*Figura 21: Imán*

- 11- Placa de cobre: situada encima del imán a una pequeña distancia y soportado por tres varillas que se emplazan en los brazos del soporte correspondiente.



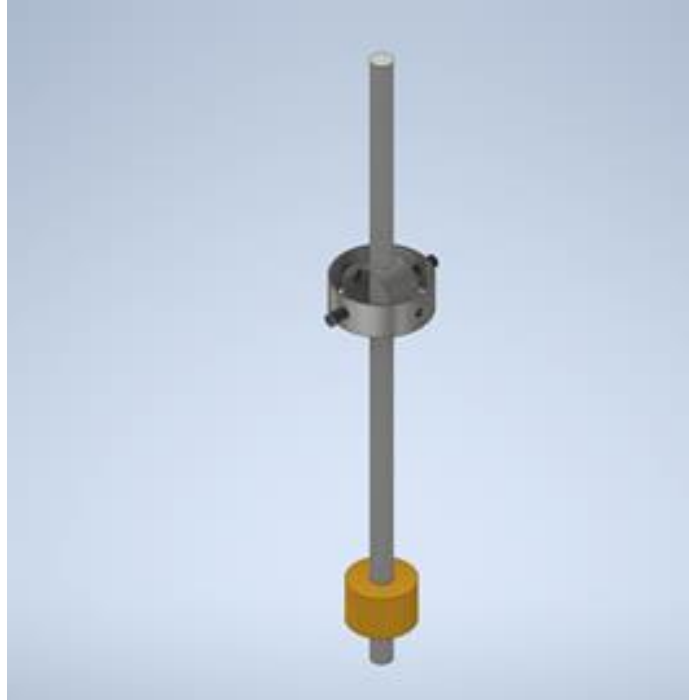
*Figura 22: Placa de cobre*

#### **4.1.3 Prototipos y proceso de mejora.**

Se comenzó el proyecto con los forjados y pilares bastante definidos, por lo que el soporte del péndulo fue lo primero que requirió de un diseño. La idea inicial era basarse en un giroscopio, de modo que permitiera al péndulo moverse en las mismas direcciones que lo hiciera el edificio.

El primer diseño (Figura 23) constaba de dos casquillos concéntricos de plástico con agujeros pasantes, a través de los cuales se insertaban los ejes. Los ejes exteriores irían anclados al forjado.

Se fabricó un prototipo de este diseño (Figura 24), gracias a esto se comprobó el elevado grado de dificultad que conllevaba su montaje; también se pudo comprobar que no cumplía con los principios del DFMA (diseño para la fabricación y montaje) que buscan sencillez en las piezas y en el montaje.



*Figura 23: Primera propuesta péndulo*

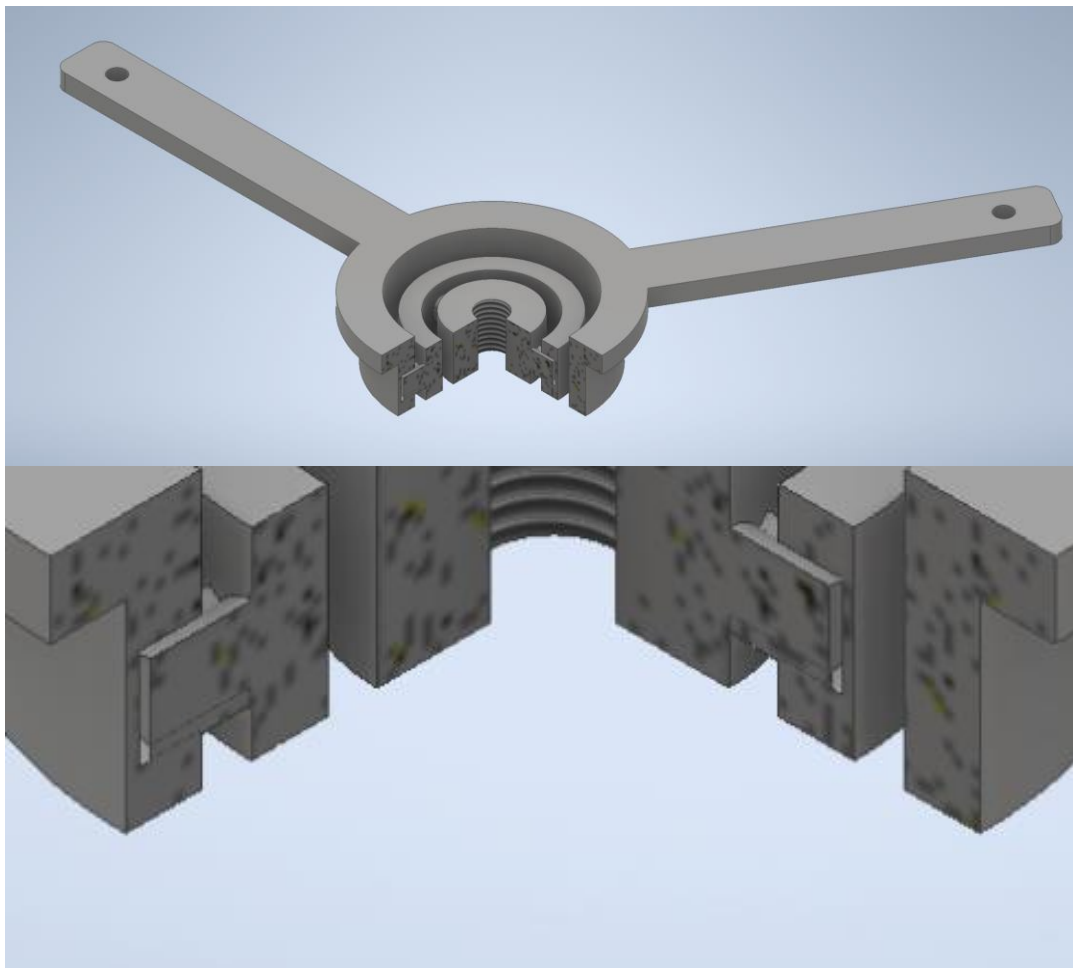


*Figura 24: Primer prototipo péndulo*

Para mejorar este modelo, se planteó la opción de añadir un casquillo adicional. Este casquillo tendría un reborde para descansar sobre el forjado y unos brazos para soportar la chapa de cobre y anclar el sistema al metacrilato.

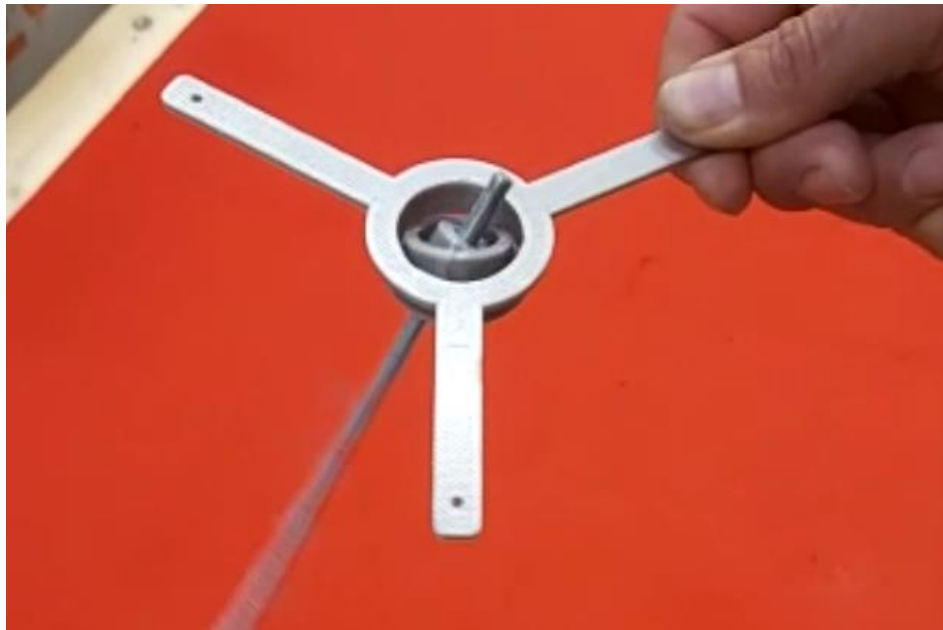
Quedaba pendiente de resolver la dificultad de montaje, por lo que, aprovechando que la pieza se fabrica en una impresora 3D, se le añadieron unas finas láminas en varios puntos de los ejes da manera que los unían a su agujero correspondiente; se puede apreciar en la Figura 1. Gracias a esto se puede imprimir el conjunto en una sola pieza.

A la hora de ponerlo en funcionamiento con unos simples giros se rompen esas láminas y quedan los ejes situados en su lugar formando un conjunto hermético.



*Figura 25: Segunda propuesta péndulo*

Se realizó una impresión de este diseño y se pudo comprobar que el sistema para imprimir el conjunto en una sola pieza funcionaba a la perfección (Figura 25).



*Figura 26: Segundo prototipo péndulo*

Finalmente se decidió acortar los brazos para obtener una pieza más compacta.

Para comprobar que el diseño funcionaba correctamente se realizó una experiencia con un soporte provisional.

Se situó el péndulo en una estructura modelo y se soportó la placa de cobre mediante unas láminas de espuma con espacio en su interior (Figura 28). El aspecto de mayor dificultad fue situar a una distancia adecuada las láminas de cobre del imán.

Se realizaron una serie de experiencias que se describen a continuación para validar el modelo.



*Figura 27: Prueba péndulo Corrientes de Foucault 1*



*Figura 28: Prueba péndulo Corrientes de Foucault 2*



En todos los ensayos se consigue una excitación inicial similar, empujando el edificio hasta un mismo punto de inicio.

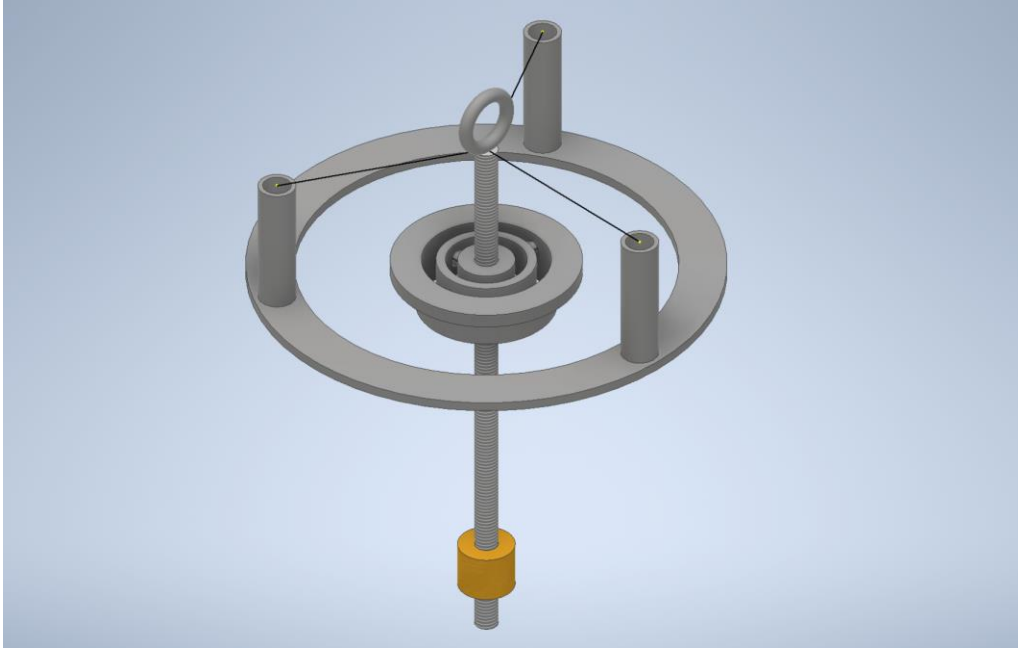
Se estudia el caso de la estructura sin péndulo, de la estructura con el péndulo sin sistema de amortiguamiento y de la estructura con el péndulo con sistema de amortiguamiento. Los resultados de los ensayos son los siguientes:

- Sin péndulo → Tarda en detener el movimiento.
- Péndulo sin amor. → Se aprecia cómo se transmiten las vibraciones al péndulo, pero al no ser frenado por nada, no genera ninguna respuesta de vuelta en la estructura.
- Péndulo con amor. → Detiene el movimiento de la estructura en el menor tiempo. El péndulo excitado se frena y genera un amortiguamiento en la estructura.

Se pudo comprobar que disipaba correctamente las vibraciones y se propuso la creación de otro modelo similar de funcionamiento más simple aún para poder dar una mayor variedad a las experiencias realizadas con el equipo.

El nuevo péndulo disipará las vibraciones por la fricción generada entre un aro disipador y el forjado sobre el que se apoya el propio péndulo; para ello se utilizará un soporte similar al anterior.

Se añade un disco de gran diámetro con tres puntos de anclaje donde se unirán varios hilos con la parte superior del péndulo, de modo que se reproducen los movimientos del péndulo en el aro disipador. Este aro generará una pérdida de energía del edificio por la fricción que se produce entre los dos (aro y metacrilato superior) (Figura 29).



*Figura 29: Propuesta péndulo con aro disipador*

Antes de realizar los primeros ensayos y prototipado, se disminuyó el tamaño de la argolla y se planteó colocar varios pesos para aumentar la fricción (Figura 30).



*Figura 30: Propuesta péndulo con aro disipador y pesos*

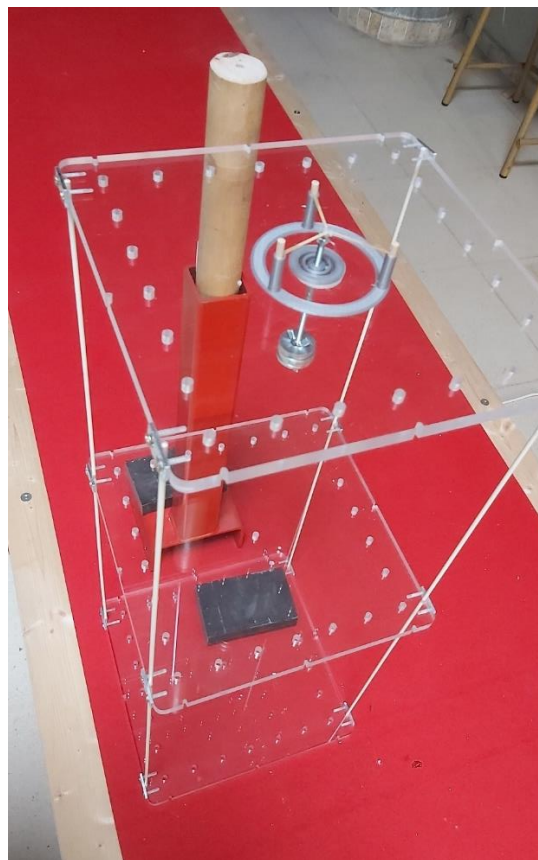
Para anclar los hilos a los postes se plantea la posibilidad de colocar unos pasadores de modo que sea más cómodo su montaje y desmontaje en los ensayos.

Se realizaron montajes y ensayos del péndulo disipador sin peso, con un peso ligero, con peso medio y con peso grande; de esta manera se buscó experimentalmente el peso ideal para una buena amortiguación.

A continuación, se describe cada prueba y su resultado:

Prueba 1: Con péndulo de fricción sin pesos.

Se desplaza la estructura hasta el tope para generar un movimiento, se observa que el péndulo sin peso no amortigua lo suficiente y los efectos son casi inexistentes.



*Figura 31: Péndulo de fricción sin pesos*

Prueba 2: Con péndulo de fricción y peso ligero.

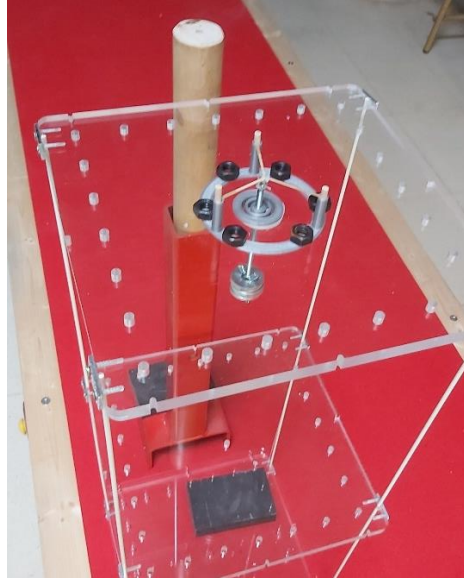
Se añaden tres tuercas de modo que suponen un peso ligero; a continuación, se desplaza la estructura hasta el tope para generar un movimiento, se observa que el péndulo con peso ligero amortigua bastante bien y pudiera ser el óptimo.



*Figura 32: Péndulo de fricción con peso ligero*

Prueba 3: Con péndulo de fricción y peso medio.

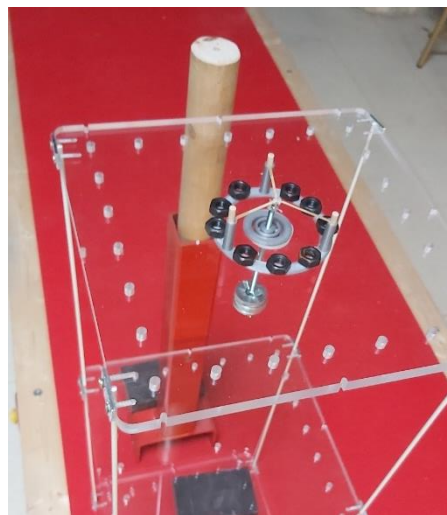
Se añaden tres tuercas más de modo que suponen un peso medio; a continuación, se desplaza la estructura hasta el tope para generar un movimiento, se observa que el péndulo con peso medio funciona peor que el anterior. El peso colocado no permite al péndulo moverse correctamente y por tanto no amortigua correctamente el movimiento de la estructura.



*Figura 33: Péndulo de fricción con peso medio*

Prueba 4: Con péndulo de fricción y peso grande.

Se añaden tres tuercas más de modo que suponen un peso grande; a continuación, se desplaza la estructura hasta el tope para generar un movimiento, se observa que el péndulo con peso alto no funciona. El peso impide el movimiento del péndulo y funciona como apéndice de la estructura sin generar amortiguamiento alguno.



*Figura 34: Péndulo de fricción con peso grande*

Al terminar estas pruebas se llega a la conclusión de que la mejor amortiguación se obtiene con un peso ligero. Queda reflejada la capacidad de regulación de este sistema simplemente cambiando el peso del aro.

Queda por tanto validado el modelo y el equipo cuenta ya con dos opciones de péndulo para que el usuario realice sus simulaciones.

## **4.2 Propuesta de industrialización**

Se detalla el paso del prototipado a la propuesta de fabricación real del equipo diseñado, definiendo métodos de fabricación, subcontratación de algunos servicios y analizando técnicas que lo permiten llevar a cabo.

### **4.2.1 Compras y proveedores.**

Se comprarán productos ya fabricados como el cáncamo hembra, las varillas de fibra de vidrio, el imán, los tornillos, la varilla roscada y las materias primas como las chapas, planchas de metacrilato y el material para la impresora 3D.

Se contacta con distribuidores locales para agilizar plazos y poder ajustar el precio en el caso de que se requieran una gran cantidad de unidades.

También será interesante intentar concentrar en un solo proveedor el mayor número de productos, ya que de este modo se ahorrarán tiempos de gestión cada vez que haya que hacer pedidos de los materiales y previsiblemente podrán de nuevo ajustar el precio un poco más.

#### 4.2.2 Subcontratación de tareas.

Los elementos que necesitan una fabricación mediante equipos que no están disponibles en la escuela, o que conlleven procesos que ocupen demasiado tiempo sin ser rentable, se comprarán a ciertas empresas que se encargarán de su fabricación.

Se necesita subcontratar las siguientes actividades:

- Fresado del metacrilato, se entregará en formato CAD un archivo con un dibujo del resultado final deseado y si saliera más barato, se facilitaría el material a la empresa subcontratada.
- De forma opcional se plantean las siguientes operaciones: corte láser de las arandelas de los pesos, del aro de disipación y del cobre.

Del mismo modo que se procede con el fresado, se enviarían archivos en CAD de los cortes deseados, teniendo siempre en cuenta que el mínimo agujero que se puede realizar es del mismo tamaño que el espesor de la chapa.

Esto supone lo siguiente: si se requiere en las arandelas un agujero de 5 mm en su centro, la mayor chapa que se podría utilizar para realizar estas piezas sería también de 5 mm de espesor.

Teniendo en cuenta las opciones anteriores, se necesitaría subcontratar a dos empresas, una que realice el fresado del metacrilato y otra que corte los elementos necesarios para obtener las diferentes piezas metálicas no estándar.

Hay que tener en cuenta que se dispone de una impresora 3D capaz de realizar el aro disipador y el soporte omnidireccional, esto nos ahorra un par de subcontrataciones. También se tendrá en cuenta, si no encaja el precio en el presupuesto, la posibilidad de cortar a láser el metacrilato.

La empresa elegida para el fresado de los metacrilatos será MACOGLASS:



*Figura 35: Logotipo Macoglass [10]*

Macoglass es una empresa dedicada a los productos y materiales de base plástica: metacrilato, polietileno, poliestireno o PVC [10].

Disponen de una fresadora de CNC de dimensiones 3000 x 2000 mm con la que realizan trabajos de corte y grabado en materiales como metacrilato, que es lo que en este caso se necesitaría para los forjados.

Para el hipotético corte láser de las arandelas, que se compran fabricadas; y del aro disipador, que originalmente se imprimirá en 3D, se decide subcontratar a la empresa LASER EBRO [11].



*Figura 36: Logotipo Laser Ebro [11]*

Disponen de una buena máquina de corte por láser y de un servicio de calderería, que combinados elaborarán el aro disipador y las arandelas, siempre y cuando encaje en el presupuesto y sea más rentable.

Las tuercas que sirven de peso en las experiencias tienen un precio y un peso que hacen que sea complicado plantear su fabricación; los espesores máximos que corta un laser de estas características ronda los 15 mm, lo cual dificulta enormemente la hipotética fabricación de las tuercas.



### 4.2.3 Equipos y fabricación propia.

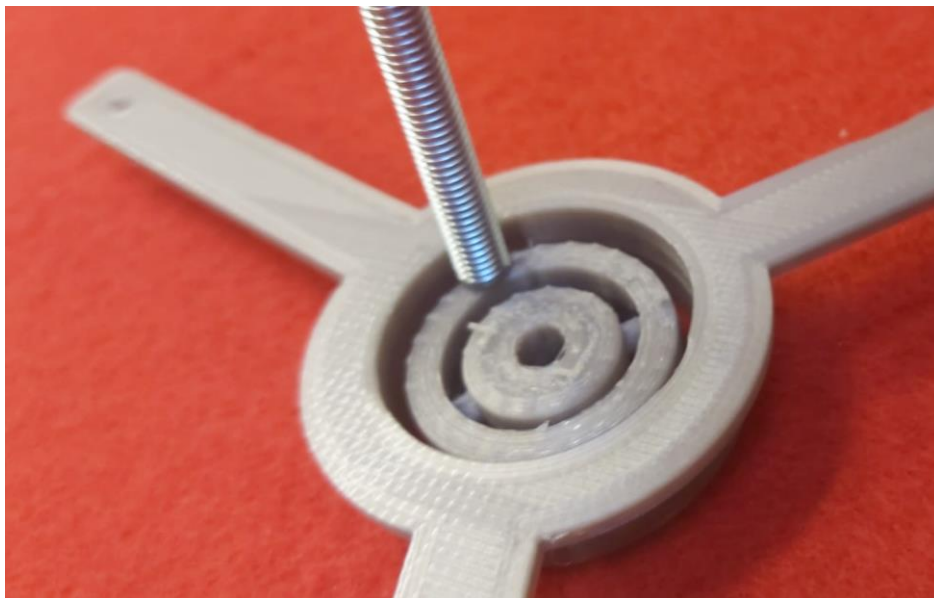
Gran parte del éxito del diseño de este equipo se debe a la impresión 3D.

Sus principales ventajas son:

- Versatilidad, con una sola máquina se podrán realizar infinidad de piezas.
- Fácil prototipado y flexibilidad, permiten un diseño con menos restricciones y más imaginativo, hasta las piezas más complejas se imprimen de un modo sencillo.
- Reducción de costes, en este caso las piezas tendrían que haber sido torneadas y ensambladas aumentando significativamente su precio.
- Mínima generación de residuo.

En el caso de este proyecto, ha sido útil para fabricar varias piezas que de otro modo habrían resultado mucho más caras. En el caso del soporte del péndulo, es prácticamente imposible de fabricarlo mediante otras técnicas.

La principal desventaja puede ser el acabado, que con materiales más asequibles se puede apreciar una superficie con imperfecciones (Figura 37).



*Figura 37: Detalle acabado impresión 3D*

En el futuro habrá que valorar si la estética de los acabados de estas piezas afecta a la percepción que tienen los clientes respecto a la calidad del producto final.

En principio con estas técnicas y calidades se puede obtener un buen precio con una calidad aceptable, cumpliendo un objetivo básico del proyecto.

### **4.3 Packaging e instrucciones de montaje**

El aspecto exterior de un producto adquiere una gran importancia a la hora de venderlo. La estética del equipo lo puede hacer más atractivo para los potenciales compradores.

Se busca un aspecto profesional para este equipo de laboratorio. Debe recoger las diferentes partes del equipo de una forma adecuada, optimizada y eficaz a lo largo del tiempo de modo que evite su deterioro.

Reuniendo estos requerimientos se llega a la conclusión de que la mejor opción es un maletín con espuma fresada, de modo que siempre se pueda volver a colocar cada pieza del equipo en su lugar tras su uso.

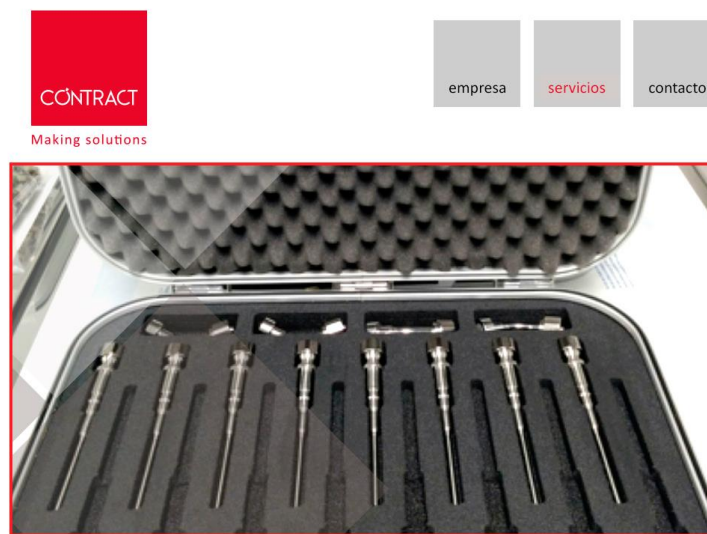
El maletín tiene un aspecto profesional, pero no tiene únicamente una función estética, sino que es una buena manera de mantener a salvo los componentes más delicados.

#### **4.3.1 Presentación del producto, embalaje y empaquetado de los componentes.**

El producto final se presentará sobre una espuma fresada que a su vez irá encajada en un maletín, para la realización de este servicio se contratará a la empresa CONTRACT, que se dedica a hacer maletines de este tipo.

Ofrece el cuerpo en aluminio o en tablero de resinas fenólicas [12], de modo que es capaz de realizar los maletines a medida y en serie. La configuración de espacios que se presenta como opción tiene en cuenta que el maletín se hace a medida, si hubiera que amoldarse a algunas medidas en particular para abaratarlo, habría que reubicar los huecos.

También hay diferentes calidades y densidades de espuma, se elegirá la más económica dentro de las que cumplan con una buena estética y funcionalidad.



*Figura 38: Maletín con espuma fresada [12]*

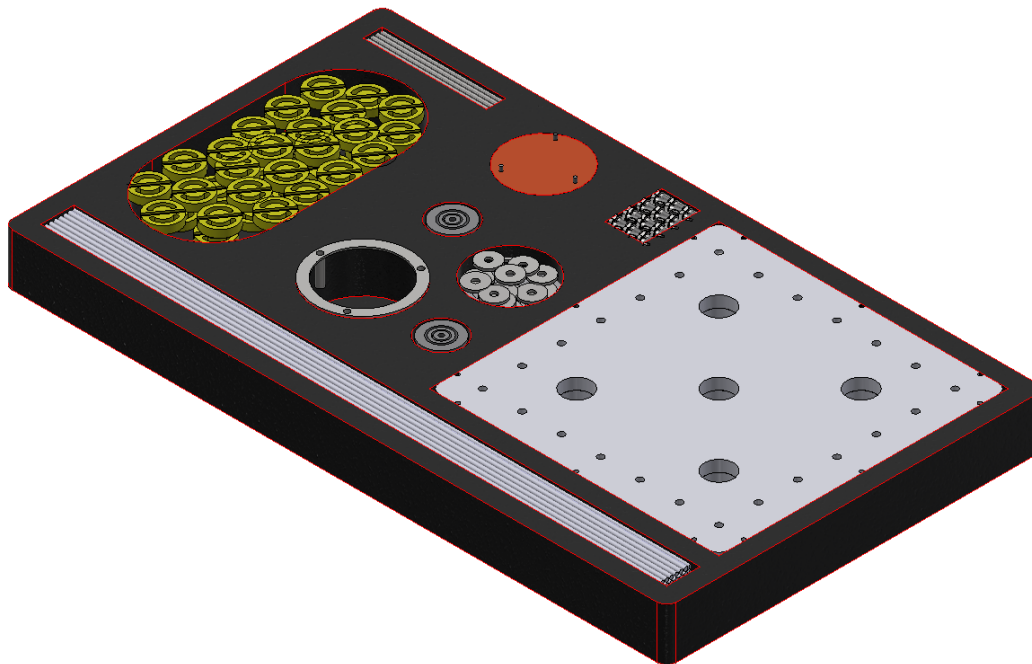
Cada componente irá encajado en su hueco correspondiente y al abrir el maletín el cliente se encontrará con los componentes recubiertos por un plástico protector.

Al igual que en cualquier fresado, se enviaría un CAD y se obtendría la forma deseada, en el caso del producto desarrollado es la representada en la figura 39, que cubre todos los requerimientos de formas para la colocación de todos sus componentes.



*Figura 39: Diseño fresado de espuma*

Una vez recibida la espuma fresada junto con su maletín, se colocará cada elemento en su posición y se recubrirá el conjunto con el plástico protector. La disposición será la que aparece en la figura 40.



*Figura 40: Packaging de las piezas del equipo*

### **4.3.2 Almacenamiento y transporte.**

Respecto al almacenamiento lo ideal sería hacer stock únicamente de los elementos más costosos y con mayor plazo de fabricación. Esto se debe a que no se cuenta con un gran almacén y los costes de alquilar uno serían grandes.

En el caso de que se pudiera tener un buen almacenamiento, la fabricación ideal sería por lotes, decidiendo cuándo se fabrica el siguiente lote en función de las ventas.

El transporte hoy en día no es un problema, al menos para un producto tan compacto, ya que cualquier agencia de envíos puede hacerlo llegar a los clientes en un plazo bastante reducido.

### **4.3.3 Ensamblaje del producto. Instrucciones de montaje.**

Los pasos a seguir a la hora del montaje son los siguientes:

- 1- Decidir el número de plantas, sus alturas y si se desean restringir movimientos en alguna dirección.
- 2- Montar la estructura del edificio general, uniendo las varillas necesarias con las bases de metacrilato, por el momento solo las verticales.
- 3- Se colocan con dos tornillos, en los emplazamientos que sean interesantes, los acoples amarillos, que permitirán reforzar las primeras uniones y acoplar barras diagonales. La estructura, llegados a este punto debería parecerse a la Figura 41.
- 4- Se decidirá qué tipo de amortiguación de desea, se continúa al paso 5 si se quiere una amortiguación por fricción del mismo modo se avanza al paso 6 si se busca una amortiguación por corrientes de Foucault.

- 5- Para montar el péndulo amortiguador por fricción se sitúa la varilla roscada en el centro del soporte sin brazos, también se coloca en la parte superior de la varilla la argolla.  
A continuación, se coloca en la parte baja el peso que interese formando un bloque; por último, se unirá mediante los hilos los casquillos del aro de disipación con la argolla del eje en su parte superior. (Figura 42)
  
- 6- Para montar el péndulo amortiguador basado en las corrientes de Foucault se situará la varilla en el centro del soporte con brazos, en la parte superior de esta varilla se coloca el imán.  
A continuación, se coloca en la parte baja de la varilla el peso deseado para la experiencia en particular; finalmente se sitúa la placa de cobre muy próxima al imán con la ayuda de las pequeñas varillas que la fijarán al soporte. (Figura 43)
  
- 7- Finalmente se pueden realizar todas las combinaciones deseadas para aproximarse lo máximo posible a situaciones reales en las diferentes experiencias.

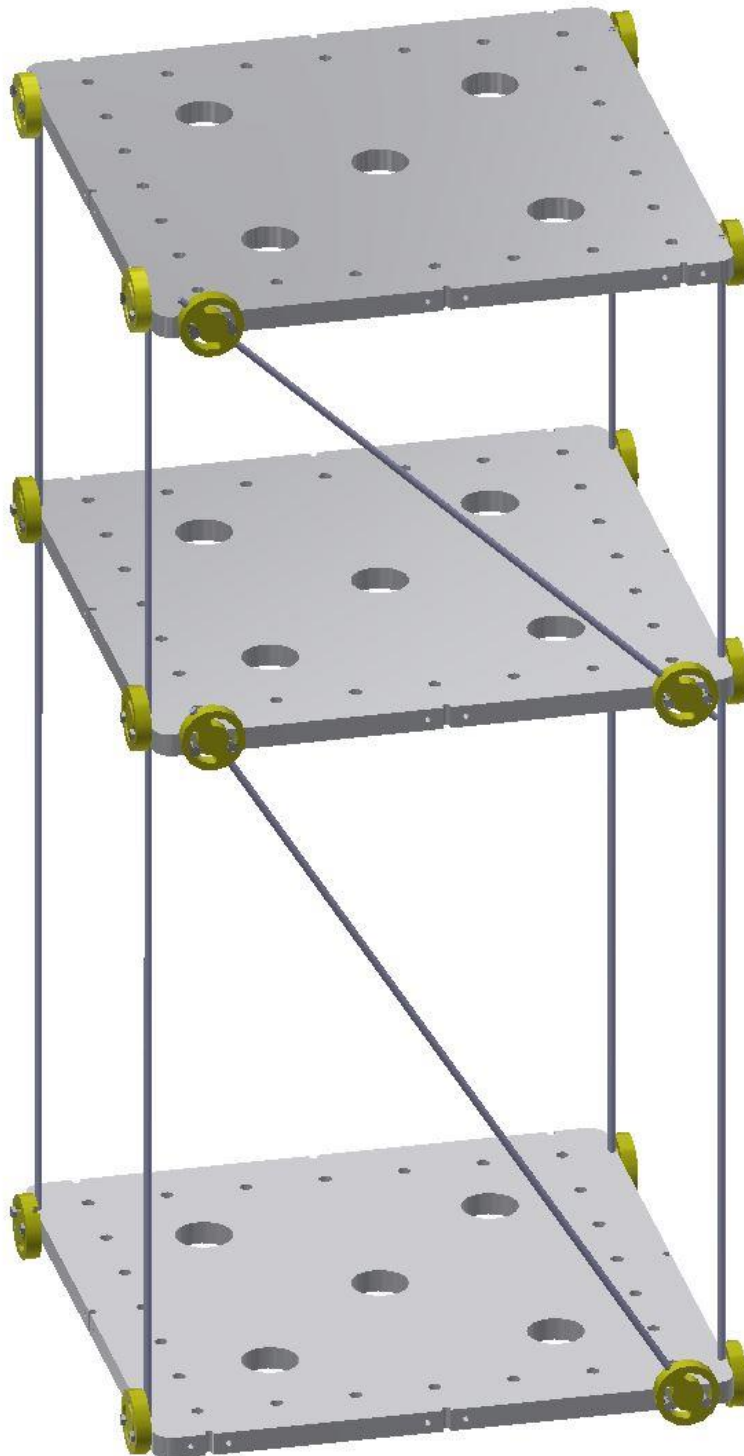


Figura 41: Disposición de estructura 1

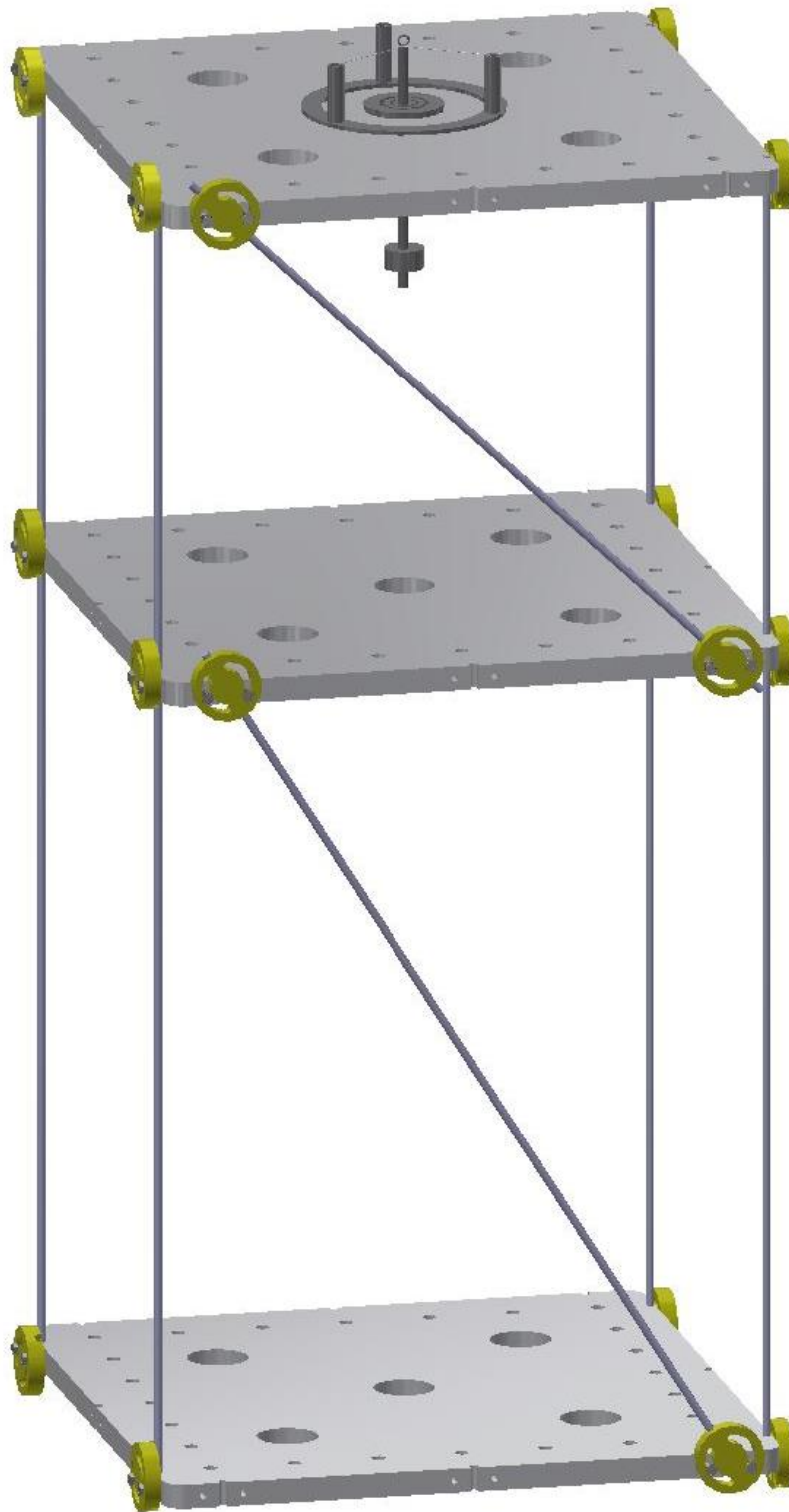


Figura 42: Disposición de estructura 2



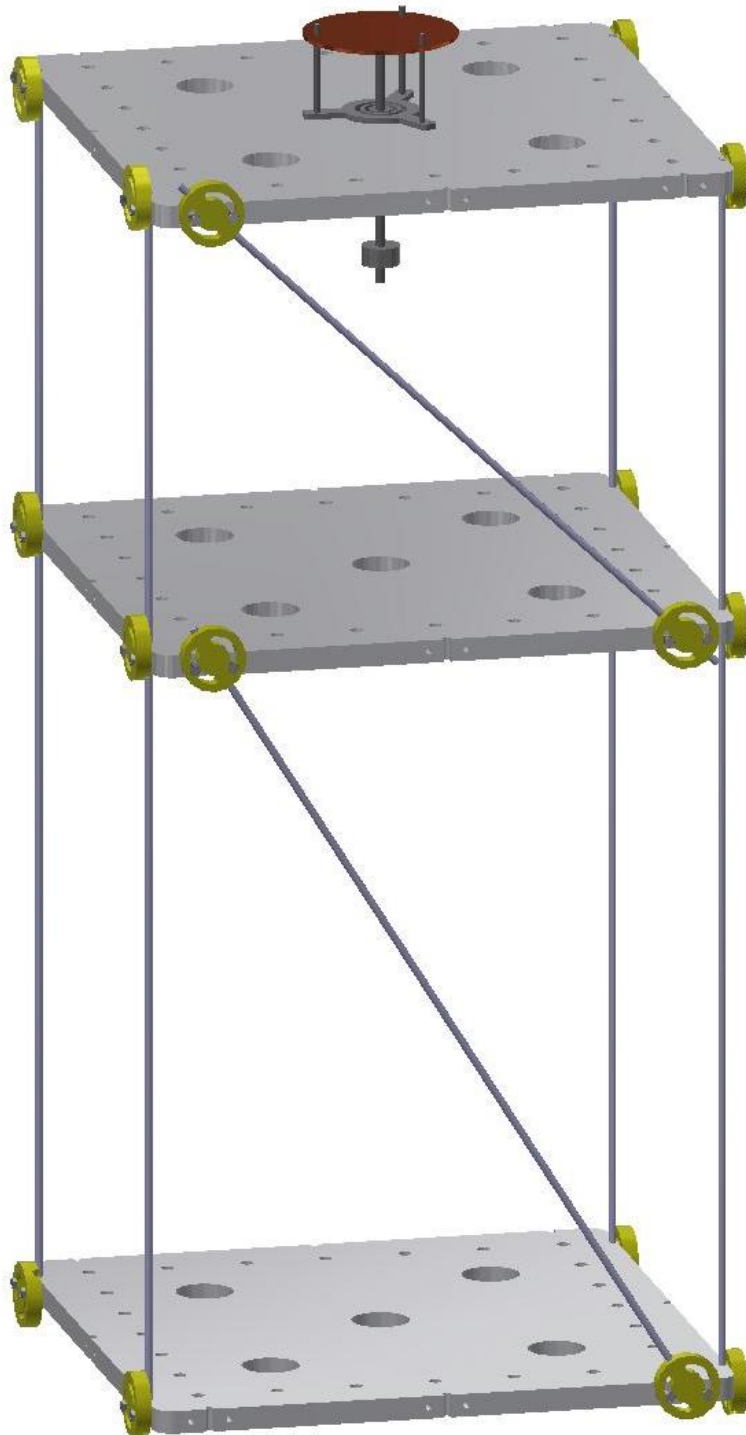


Figura 43: Disposición de estructura 3

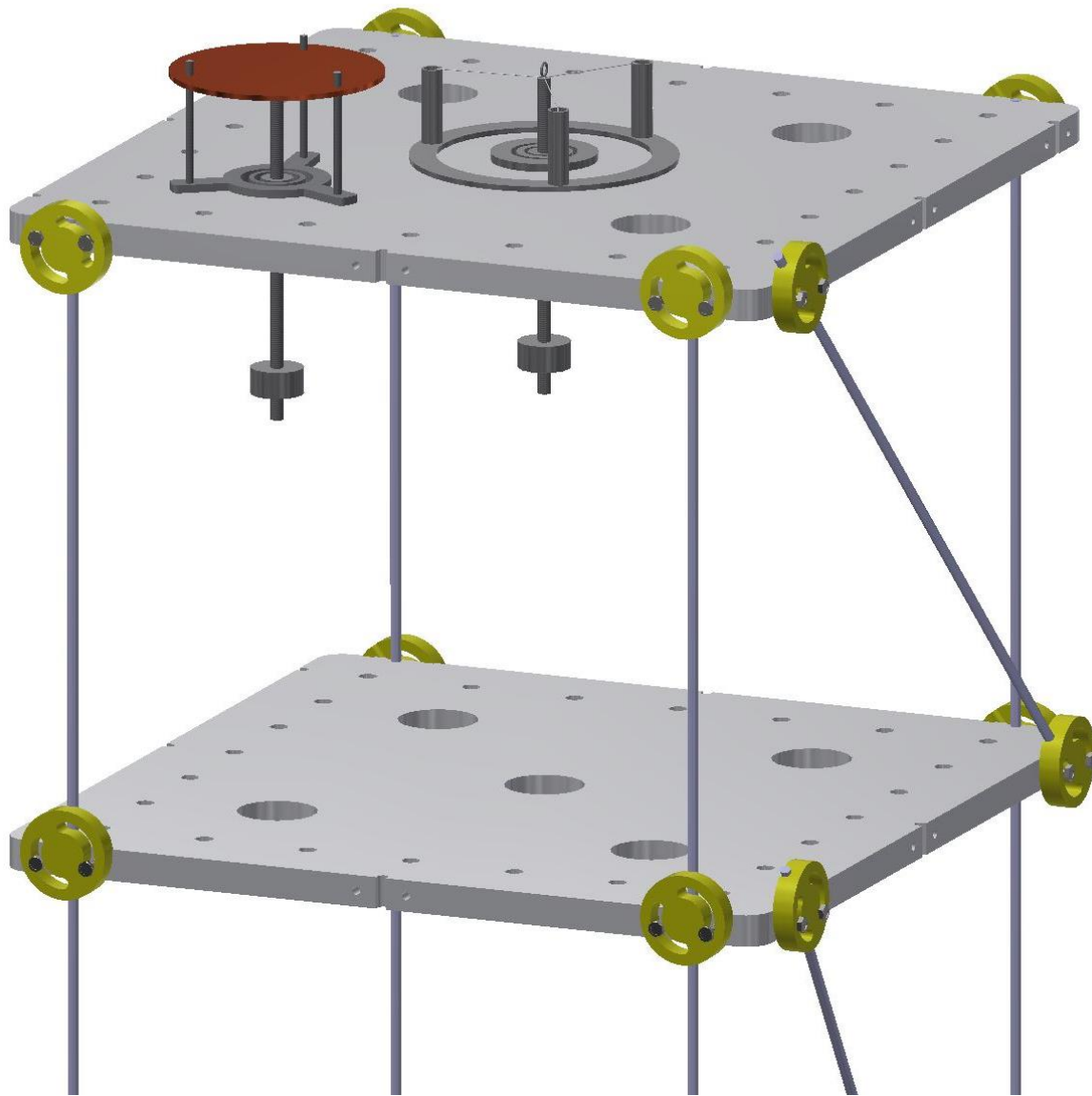


Figura 44: Disposición de estructura 4

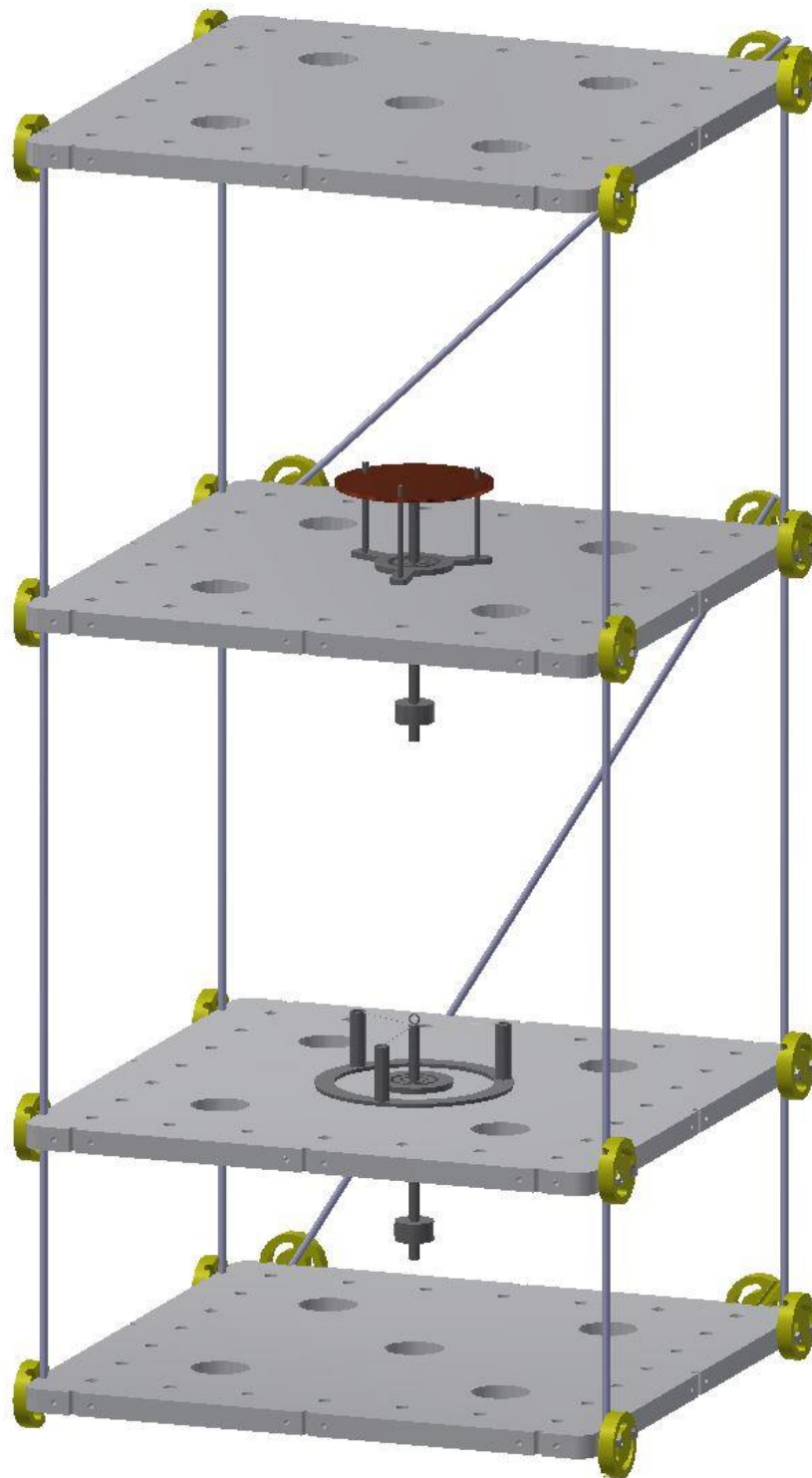


Figura 45: Disposición de estructura 5



## **5. CONCLUSIONES y CONSIDERACIONES ADICIONALES**

### **5.1 Conclusiones**

Se han logrado alcanzar los diferentes objetivos propuestos al inicio de este proyecto:

- El diseño final del proyecto se ha desarrollado atendiendo, sobre todo, a la facilidad, utilidad y comodidad de su empleo. Por tanto, se ha logrado un proyecto funcional.
- A continuación, se describe el presupuesto, donde se comprueba que se alcanza un precio razonable y adecuado para el producto.
- Se ha logrado un equipo versátil, capaz de adaptarse a las necesidades del cliente, con dos sistemas diferentes de amortiguamiento y la posibilidad de restringir movimientos de la estructura.
- Se han utilizado nuevas tecnologías en el desarrollo del proyecto, la implementación de la tecnología de impresión 3D en el proceso de fabricación ha permitido prescindir de un tornero y se ha alcanzado un alto grado de simplificación de las piezas a fabricar.

El resultado final del equipo es atractivo, versátil, funcional, fácil de ensamblar y tiene un precio razonable, se puede concluir que ha sido un éxito.

### **5.2 Presupuesto y costes de fabricación.**

Se ha elaborado un presupuesto con los costes de fabricación de modo que se pueda conocer un coste aproximado de cada equipo.

<b>Pieza</b>	<b>Precio</b>	<b>Unidades</b>	<b>Total</b>
Base metacrilato fresada	20,00 €	4	80,00 €
Varillas fibra de vidrio 1000 mm	2,54 €	10	25,40 €
Acoples rápidos	0,15 €	36	5,40 €
Soportes péndulos	0,45 €	3	1,35 €
Tornillos M5	0,05 €	72	3,60 €
Chapa cobre	23,00 €	1	23,00 €
Argolla	1,20 €	1	1,20 €
Imanes	0,50 €	2	1,00 €
Varilla roscada M5	2,55 €	3	7,65 €
Aro disipador	27,00 €	1	27,00 €
Espuma fresada	23,00 €	1	23,00 €
Maletín	42,00 €	1	42,00 €
<b>Total costes</b>			<b>240,60 €</b>

*Tabla 2: Costes de fabricación*

Este presupuesto corresponde a la fabricación de un pack de piezas. Este pack incluye las piezas necesarias para realizar como máximo un montaje con cuatro pisos y tres péndulos.

No se ha tenido en cuenta la mano de obra necesaria para adecuar las varillas que hay que cortar a medida, ni tampoco la mano de obra de la colocación de cada pieza

en su lugar correspondiente. Esto se debe ya que al no ser una empresa simplemente se describen los costes directos.

Viendo el total de los costes de fabricación y teniendo en cuenta que muy probablemente se podrían reducir si se fabricaran en grandes cantidades; se comprueba que el equipo tendrá un precio competitivo en el mercado.

### **5.3 Consideraciones medioambientales.**

Durante la fabricación de los componentes del equipo se ha evitado utilizar procesos de sustracción de material, ya que desperdician una gran cantidad de materia prima. Por ejemplo, el torneado de piezas se realiza a partir de bloques macizos y en este caso varias operaciones se han realizado a partir de impresión 3D, que es una técnica de adición de material.

Cabe destacar que las piezas generadas en el proceso de creación de este proyecto quedarán a disposición de los alumnos de modo que aumentará su vida útil.





## BIBLIOGRAFÍA

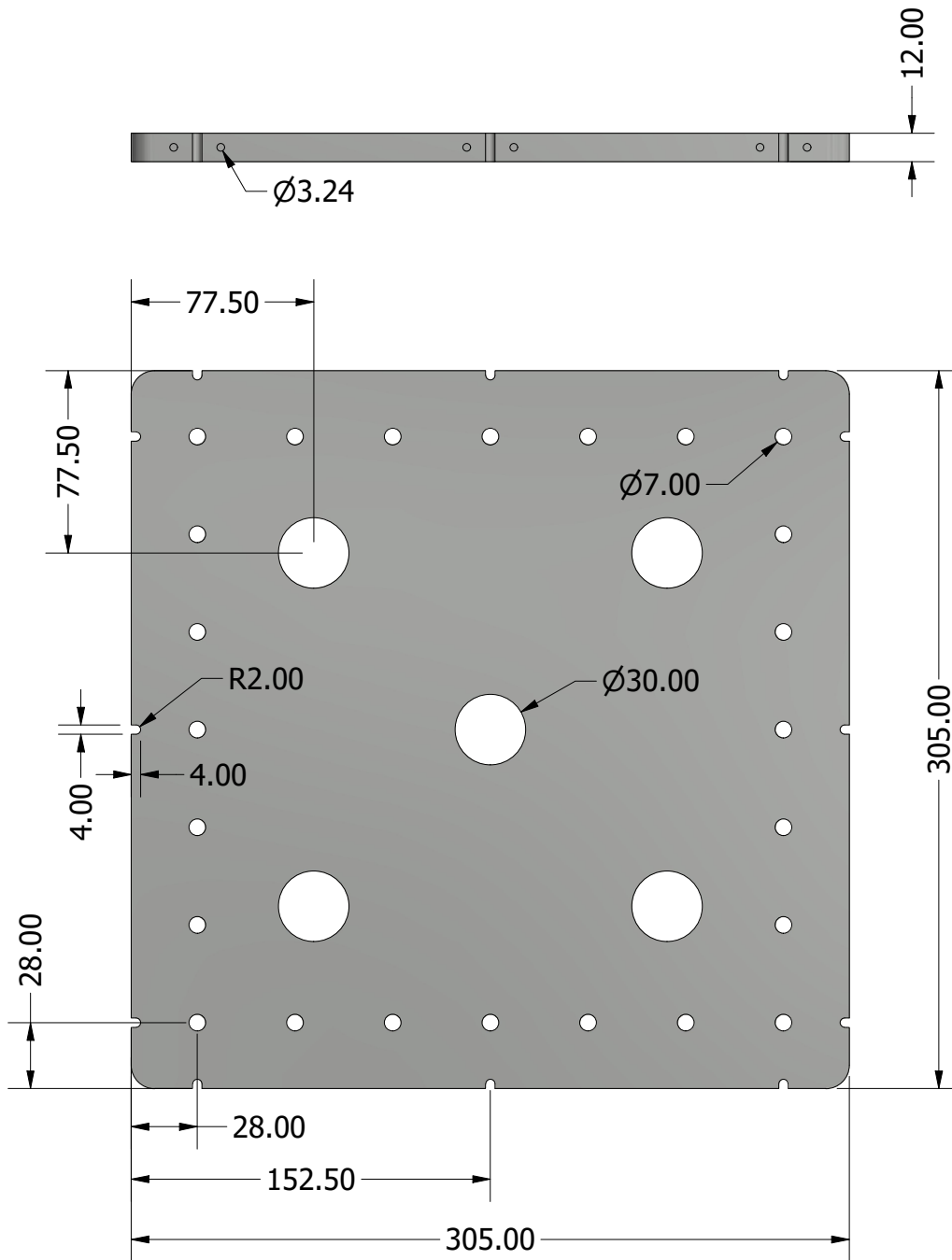
- [1] Megaconstrucciones, «Taipei 101,» [Online] Available: <https://megaconstrucciones.net/?construccion=taipei-101> (accessed May, 2021)
- [2] J. L. G. García, «Diseño, construcción y caracterización de una maqueta de edificio multiplanta para prácticas de vibraciones,» Valladolid, 2016.
- [3] J. Villanueva González, «Prototipado de una maqueta modular de un edificio multidireccional,» Valladolid, 2019.
- [4] QUANSER, «Quanser, about,» [Online] Available: <https://www.quanser.com/about/> (accessed May, 2021)
- [5] QUANSER, «Active mass damper» [Online] Available: <https://www.quanser.com/products/active-mass-damper/> (accessed May, 2021)
- [6] EDIBON, «Edibon, sobre nosotros» [Online] Available: <https://www.edibon.com/es/content/quienes-somos> (accessed May, 2021)
- [7] EDIBON, «Edibon, equipo de vibraciones libres» [Online] Available: <https://www.edibon.com/es/equipo-de-vibraciones-libres> (accessed May, 2021)
- [8] TIPLER, MOSCA, «Física para la ciencia y la tecnología I» (6ª edición). Barcelona, 2010.
- [9] Min Ho Chey, «Passive and semi-active tuned mass damper building systems» Canterbury, 2007.
- [10] MACOGLASS, «Macoglass, inicio» [Online] Available: <https://www.macoglass.com/> (accessed May, 2021)

- [11] LASER EBRO, «Laser Ebro, inicio» [Online] Available:  
<https://www.laserebro.com> (accessed May, 2021)
- [12] CONTRACT, «Contract soluciones, productos» [Online] Available:  
<http://www.contractsoluciones.com/productos.html> (accessed May, 2021)



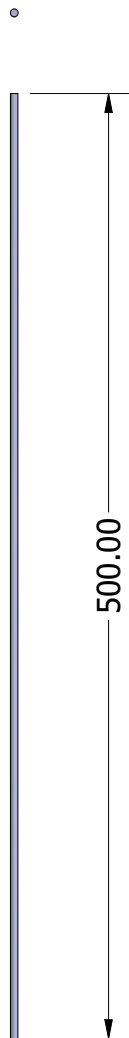
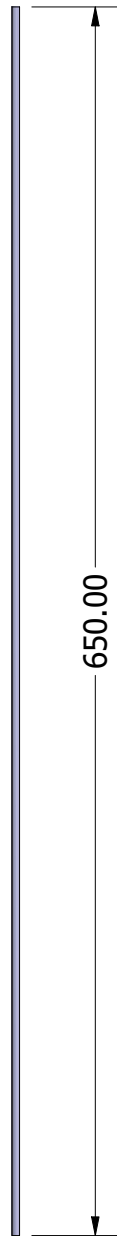
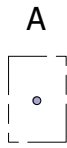
## Anexo - PLANOS DE DESPIECE

# FORJADO METACRILATO

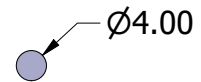


DRAWN DAVID CASELLES HERNÁNDEZ	05/05/2021	UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES		
CHECKED				
QA		TITLE		
MFG		DESPIECE ESTRUCTURA CON DISIPADORES PENDULARES		
APPROVED		SIZE A4	DWG NO TFG.05052021.DCH	REV
		SCALE 1:3	SHEET 1 OF 8	

# VARILLAS PILARES Y DIAGONALES

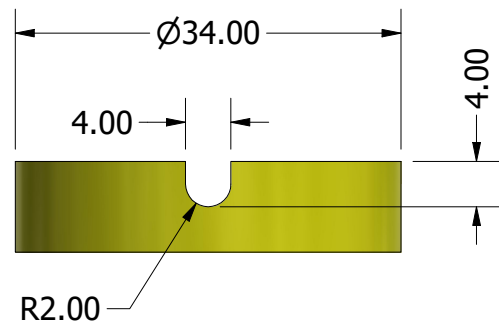
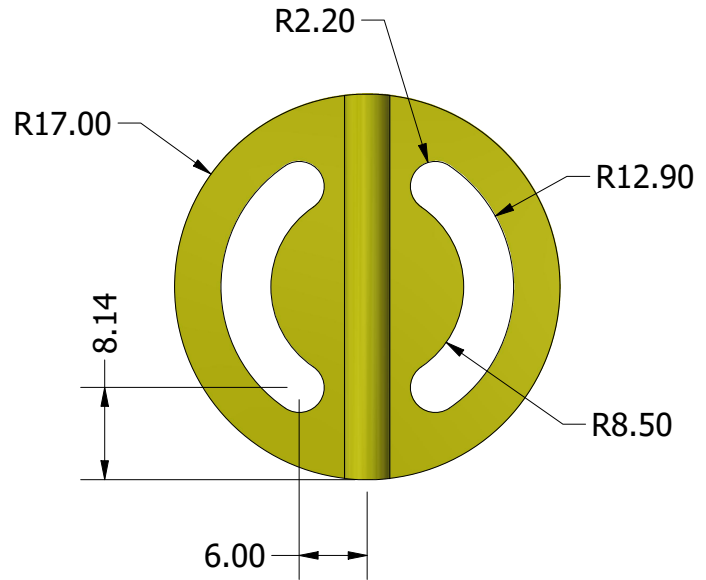
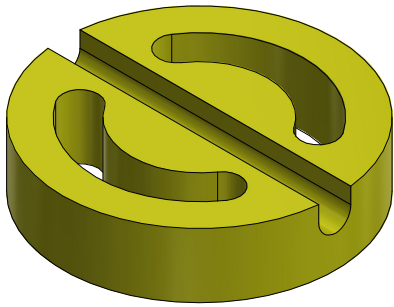


DETALLE A  
ESCALA 1:1



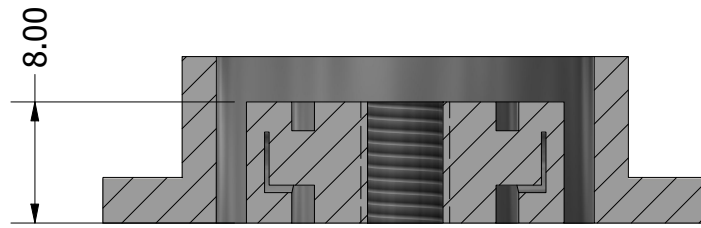
DRAWN DAVID CASELLES HERNÁNDEZ	05/05/2021	UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES		
CHECKED				
QA		TITLE		
MFG		DESPIECE ESTRUCTURA CON DISIPADORES PENDULARES		
APPROVED		SIZE A4	DWG NO TFG.05052021.DCH	REV
		SCALE 1:4	SHEET 2 OF 8	

# ACOPLE RÁPIDO

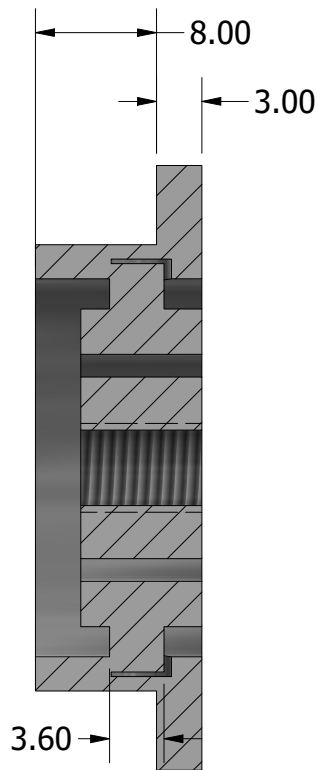


DRAWN DAVID CASELLES HERNÁNDEZ	05/05/2021	UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES		
CHECKED				
QA		TITLE		
MFG		DESPIECE ESTRUCTURA CON DISIPADORES PENDULARES		
APPROVED		SIZE A4	DWG NO TFG.05052021.DCH	REV
		SCALE 3 : 2	SHEET 3 OF 8	

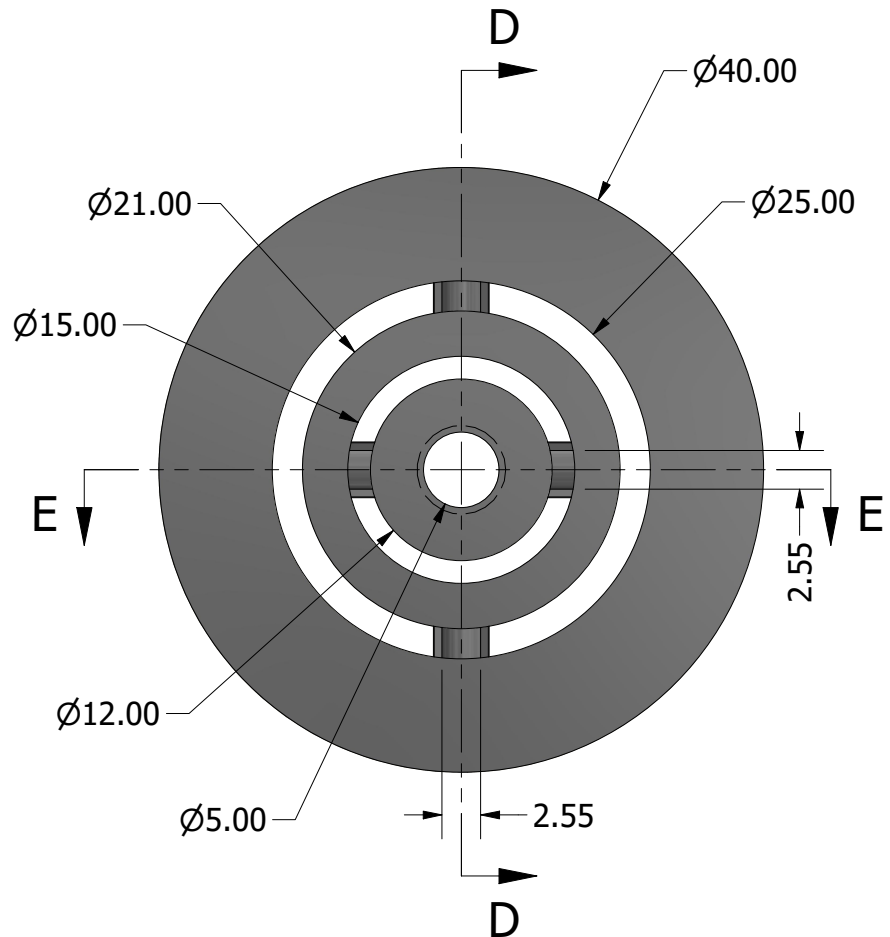
# SOPORTE PÉNDULO SIN BRAZOS



SECCIÓN E-E  
ESCALA 2 : 1



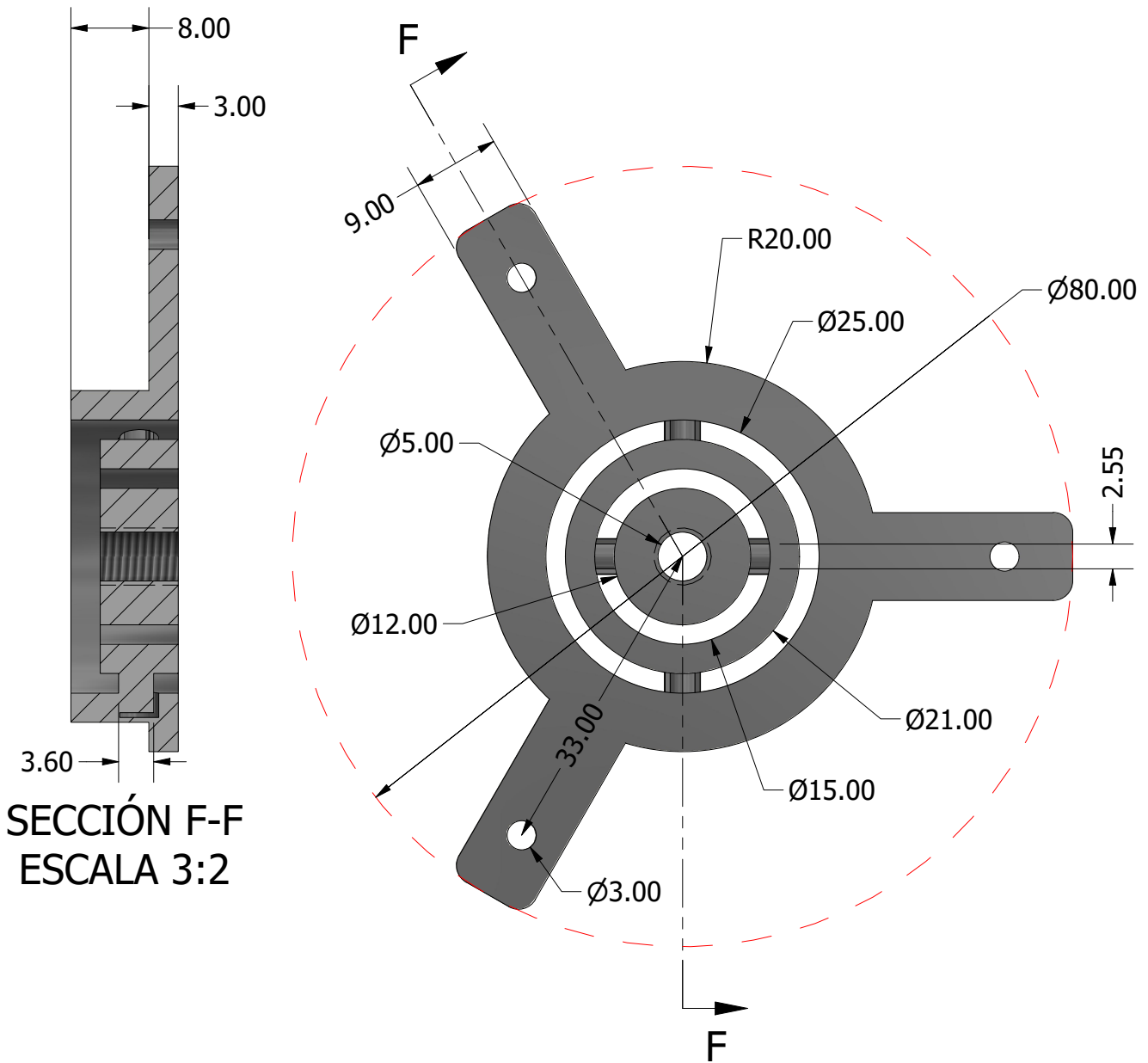
SECCIÓN D-D  
ESCALA 2 : 1



DRAWN DAVID CASELLES HERNÁNDEZ		05/05/2021		UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES		
CHECKED						
QA				TITLE		
MFG				DESPIECE ESTRUCTURA CON DISIPADORES PENDULARES		
APPROVED				SIZE	DWG NO	REV
				A4	TFG.05052021.DCH	
				SCALE	SHEET 4 OF 8	
				2 : 1		

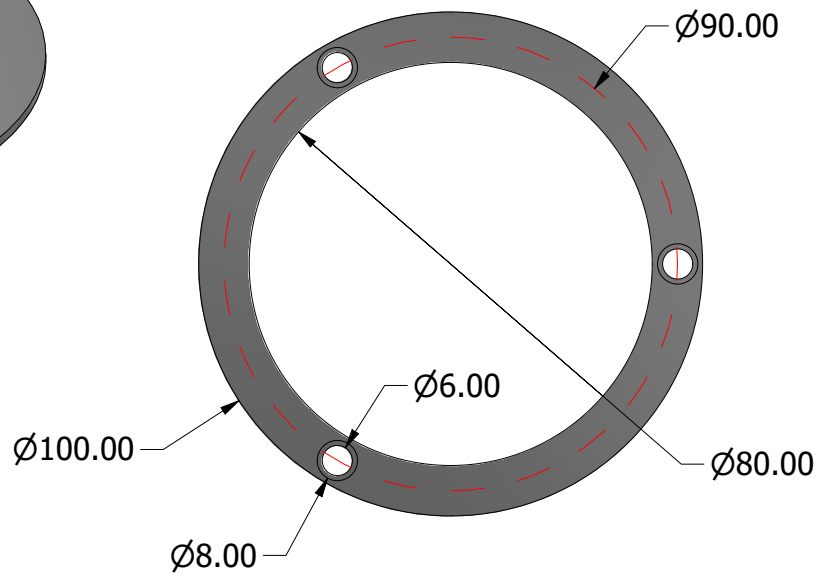
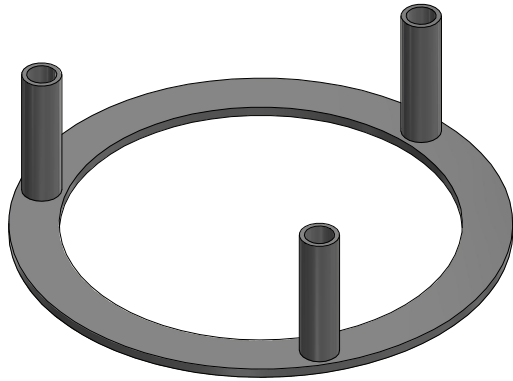
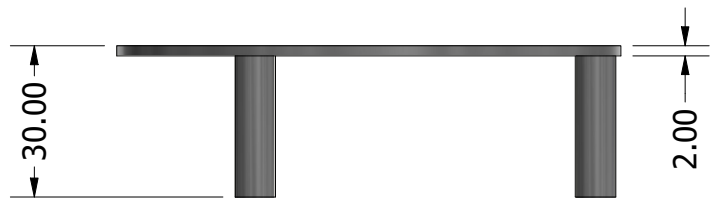


# SOPORTE PÉNDULO CON BRAZOS



DRAWN DAVID CASELLES HERNÁNDEZ	05/05/2021	UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES		
CHECKED		TITLE		
QA		DESPIECE ESTRUCTURA CON DISIPADORES PENDULARES		
MFG		SIZE	DWG NO	REV
APPROVED		A4	TFG.05052021.DCH	
		SCALE	SHEET 5 OF 8	
		3:2		

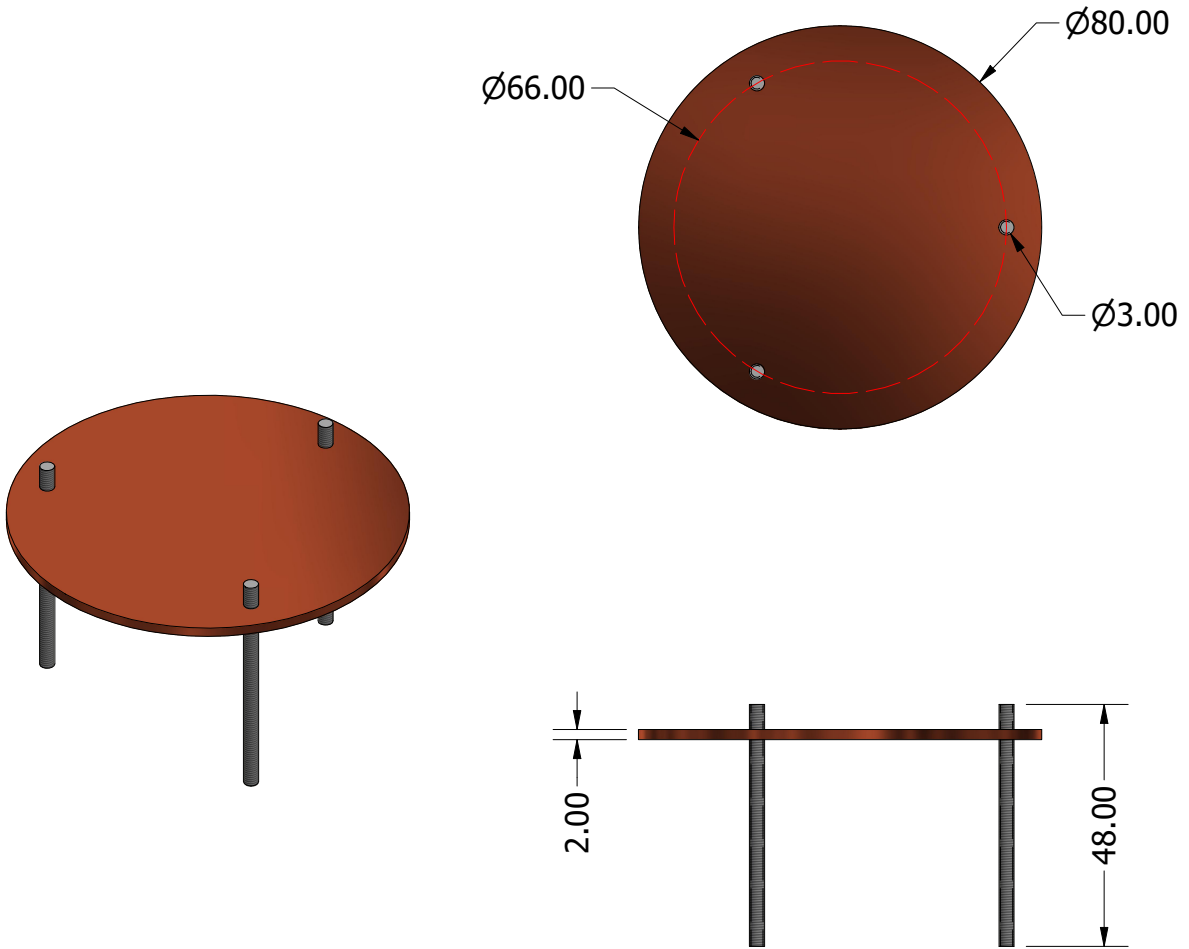
# ARO DISIPADOR



DRAWN	DAVID CASELLES HERNÁNDEZ	05/05/2021
CHECKED		
QA		
MFG		
APPROVED		

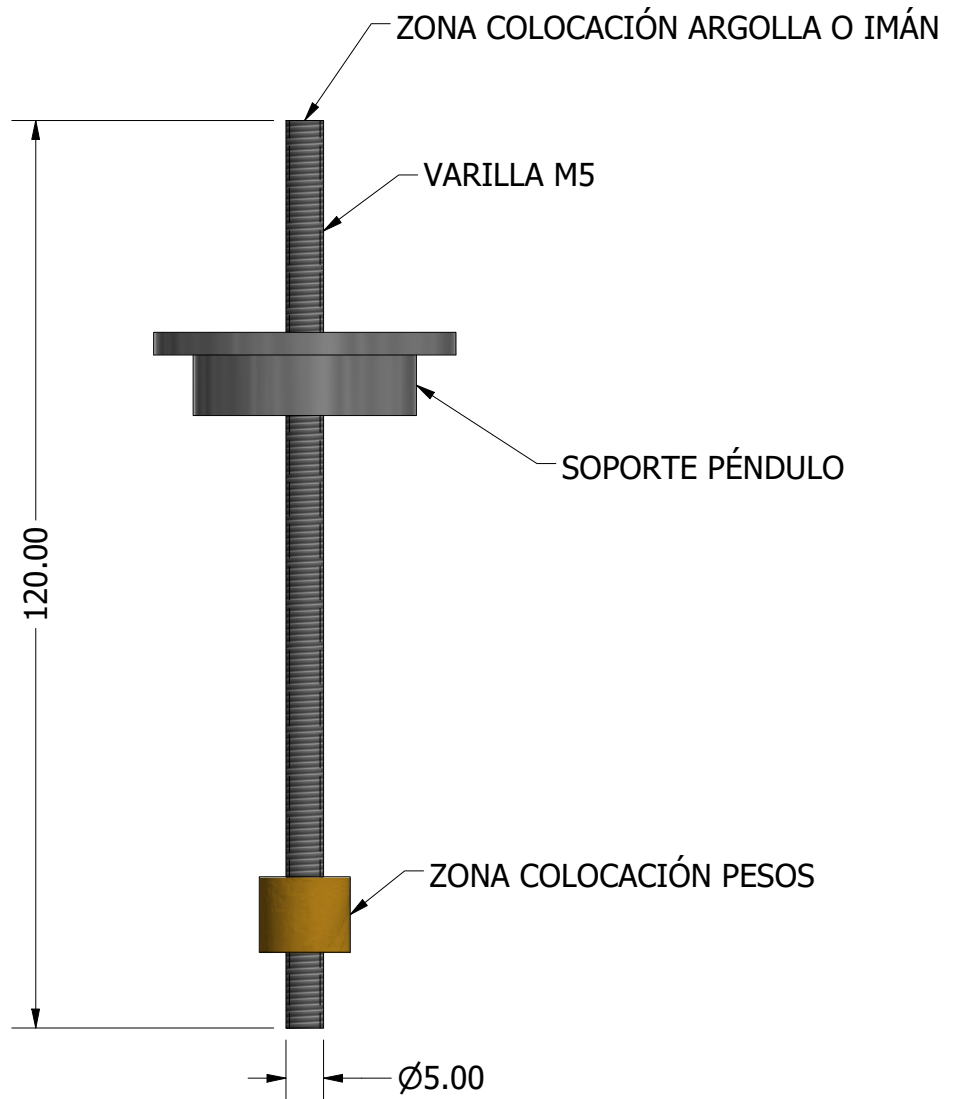
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES		
TITLE		
DESPIECE ESTRUCTURA CON DISIPADORES PENDULARES		
SIZE	DWG NO	REV
A4	TFG.05052021.DCH	
SCALE	SHEET 6 OF 8	
2:3		

# PLACA DE COBRE CON POSICIONADORES



DRAWN DAVID CASELLES HERNÁNDEZ	05/05/2021	UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES		
CHECKED		TITLE		
QA		DESPIECE ESTRUCTURA CON DISIPADORES PENDULARES		
MFG		SIZE	DWG NO	REV
APPROVED		A4	TFG.05052021.DCH	
		SCALE	2:3	SHEET 7 OF 8

# VARILLA Y DISPOSICIÓN GENERAL PÉNDULO



DRAWN DAVID CASELLES HERNÁNDEZ	05/05/2021	UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES		
CHECKED		TITLE		
QA		DESPIECE ESTRUCTURA CON DISIPADORES PENDULARES		
MFG		SIZE	DWG NO	REV
APPROVED		A4	TFG.05052021.DCH	
		SCALE	1:1	SHEET 8 OF 8