

Escuela de Ingeniería Industrial

TRABAJO FIN DE MASTER

Diseño y cálculo estructural de un dispositivo para el tratamiento de epilepsia mediante imanes.

Máster Universitario en Ingeniería en Industrial

ALUMNO: Sergio Moldes Álvarez

DIRECTORES: Eduardo Suárez Porto

María Concepción Paz Penín

Universida_de Vigo

RESUMEN

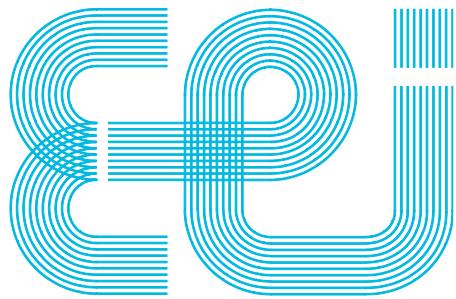
El objetivo de este proyecto es el de llevar a cabo el desarrollo de un dispositivo seguro y eficiente para el tratamiento de la epilepsia en el ámbito clínico, además de contar con las dimensiones adecuadas para su utilización terapéutica en pacientes en edad pediátrica.

Primeramente, se exploran las diferentes alternativas a nivel de materiales, teniendo en cuenta los requisitos preestablecidos que implican compatibilidad electromagnética y una correcta resistencia mecánica.

Con esto, se realizan diferentes modelos en SolidWorks y CatiaV5, llegando a combinar ambos programas, buscando el mejor resultado posible para todos los componentes de este proyecto.

Finalmente, el diseño se compone de 3 componentes principales, para los cuales se realiza un análisis magnético y estático, sometiéndolo a las dos situaciones posibles producidas durante un hipotético uso clínico.

Como resultado final se obtiene un diseño que cumple con todos los requisitos impuestos, facilitándose su construcción a través de planos detallados, y reflejándose todo el proceso en el presupuesto.



Escuela de Ingeniería Industrial

TRABAJO FIN DE MASTER

Diseño y cálculo estructural de un dispositivo para el tratamiento de epilepsia mediante imanes.

Máster Universitario en Ingeniería en Industrial

Documento

ÍNDICE

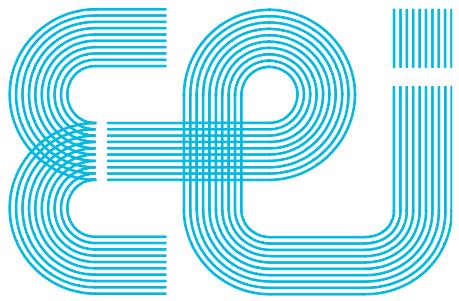
Universida_de Vigo

ÍNDICE DE DOCUMENTOS

I. Memoria

II. Planos

III. Presupuesto



Escuela de Ingeniería Industrial

TRABAJO FIN DE MASTER

Diseño y cálculo estructural de un dispositivo para el tratamiento de epilepsia mediante imanes.

Máster Universitario en Ingeniería en Industrial

Documento

MEMORIA

Universida_de Vigo

CONTENIDO

Contenido	0
Figuras.....	0
Tablas	0
1 Introducción	1
2 Estado del arte.....	4
3 Objetivos	6
4 Diseño conceptual	7
4.1 Primer modelo	8
4.1.1 Casco versión 1	8
4.1.2 Conjunto de posicionadores versión 1	11
4.2 Segundo modelo	12
4.2.1 Casco versión 2	12
4.2.2 Conjunto de posicionadores versión 2	14
4.3 Tercer modelo.....	15
4.3.1 Casco versión 3	15
4.4 Cuarto modelo	16
4.4.1 Casco versión 4	16
4.4.2 Conjunto de posicionadores versión 3	18
4.5 Versión final	19
4.5.1 Casco versión final	19
4.5.2 Conjunto de posicionadores versión final	21
4.5.3 Soporte de unión.....	22
5 Diseño de detalle.....	23
5.1 Material.....	23
5.1.1 PA 12.....	23
5.1.2 Aluminio 7075.....	23
5.2 Tornillería	24
5.2.1 Tornillo DIN 912 de titanio.....	24
5.2.2 Tuerca autoblocante DIN 985 de titanio	24
5.2.3 Arandela DIN 125 de titanio	24
5.3 Elementos comerciales	25
5.3.1 Grúa para minusválidos.....	25
5.3.2 Imanes	25
6 Cálculos justificativos.....	27
6.1 Arreglo de geometría	27
6.1.1 Simplificación casco	27

6.1.2 Simplificación del conjunto de posicionadores.....	27
6.1.3 Soporte	28
6.2 Mallado	29
6.2.1 Preparación premallado	29
6.2.2 Mallado bidimensional en Hypermesh.....	29
6.2.3 Mallado tridimensional en ANSYS Fluent Meshing	31
6.3 Análisis magneto-estático.....	34
6.3.1 Configuración de ANSYS Workbench	34
6.3.2 Resultados del análisis	40
6.4 Análisis estático-estructural.....	44
6.4.1 Configuración de ANSYS Workbench	45
6.4.2 Resultados simulación.....	49
7 Conclusiones y líneas futuras.....	53
8 Bibliografía	54
9 Anexos	57
9.1 Fichas técnicas tornillería	57
9.1.1 DIN 912.....	57
9.1.2 DIN 125	57
9.1.3 DIN 985.....	57
9.2 Propiedades imanes de neodimio	58
9.2.1 Propiedades magnéticas	58

FIGURAS

Figura 1: Sistema nervioso central [1]	1
Figura 2: Fármacos [13]	3
Figura 3: Gustav Fritsch y Eduard Hitzig [17]	4
Figura 4: Casco tratamiento transcraneal [22]	5
Figura 5: Primer modelo	8
Figura 6: Unión entre tubos v1	9
Figura 7: Negativo casco v1	9
Figura 8: Negativo casco v2	10
Figura 9: Problema pieza lateral	10
Figura 10: Conjunto de posicionadores v1	11
Figura 11: Detalles casquillo roscado	11
Figura 12: Segundo modelo	12
Figura 13: Unión entre tubos v2	13
Figura 14: Unión entre tubos v2	13
Figura 15: Conjunto de posicionadores v2	14
Figura 16: Comparación casquillo roscado v1 vs v2	14
Figura 17: Tercer modelo.....	15
Figura 18: Exterior tercer modelo.....	16
Figura 19: Cuarto modelo	16
Figura 20: Comparación de casco v3 vs casco v4	17
Figura 21: Detalles modelo 4.....	17
Figura 22: Conjunto de posicionadores v3	18
Figura 23: Comparación casquillo roscado v2 vs v3	18
Figura 24: Modelo final	19
Figura 25: Detalles modelo final.....	20
Figura 26: Dimensiones ranura	20
Figura 27: Conjunto de posicionadores final	21
Figura 28: Detalles cilindro posicionador.....	21
Figura 29: Soporte de unión.....	22
Figura 30: Dimensiones soporte de unión	22
Figura 31: PA12 smooth [25]	23
Figura 32: Dimensiones soporte de unión [25].....	23
Figura 33: DIN 912 [26]	24
Figura 34: DIN 985 [27]	24
Figura 35: DIN 125 [28]	24
Figura 36: Grúa para minusválidos [29]	25
Figura 37: DIN 912.....	27
Figura 38: Conjunto simplificado posición 1.....	28
Figura 39: Conjunto simplificado posición 2.....	28

Figura 40: Soporte simplificado.....	28
Figura 41: Superficies Hypermesh.....	30
Figura 42: MNH y Skew de elementos triangulares [33]	30
Figura 43: Arreglo manual de elementos problemáticos	31
Figura 44: Dominios de malla.....	31
Figura 45: Regiones sólidas	32
Figura 46: Malla volumétrica casco	32
Figura 47: Malla volumétrica soporte	32
Figura 48: Malla volumétrica posicionadores.....	33
Figura 49: Malla volumétrica imanes	33
Figura 50: ANSYS Workbench magneto-static.....	34
Figura 51: Configuración recinto cerrado	36
Figura 52: Partes y distribución en Design Modeler	36
Figura 53: Asignación numérica de imanes	37
Figura 54: Sentido eje de coordenadas y de polarización de los imanes	38
Figura 55: Configuración “fase sizing”	38
Figura 56: Configuración “patch conforming method”	39
Figura 57: Malla imanes	39
Figura 58: Malla cubierta de aire	39
Figura 59: Configuración “Magnetic flux parallel”	40
Figura 60: Densidad total de flujo magnético posición 1	40
Figura 61: Densidad total de flujo magnético en plano de corte posición 1	41
Figura 62: Intensidad total de campo magnético posición 1	41
Figura 63: Intensidad total de campo magnético en plano de corte posición 1	41
Figura 64: Fuerzas totales en las superficies de los imanes posición 1	42
Figura 65: Densidad total de flujo magnético posición 2	42
Figura 66: Densidad total de flujo magnético en plano de corte posición 2	43
Figura 67: Intensidad total de campo magnético posición 2	43
Figura 68: Intensidad total de campo magnético en plano de corte posición 2	43
Figura 69: Fuerzas totales en las superficies de los imanes posición 2	44
Figura 70: ANSYS Workbench static-structural	44
Figura 71: Input posición 1	46
Figura 72: Input posición 2	46
Figura 73: Detalle unión “bonded”	47
Figura 74: Detalle configuración de la gravedad	48
Figura 75: Detalle fixed support	48
Figura 76: Tensión de Von Mises posición 1	49
Figura 77: Detalle de pico de tensión en casco	49
Figura 78: Factor de seguridad posición 1	50
Figura 79: Deformación total posición 1	50
Figura 80: Tensión de Von Mises posición 2	51
Figura 81: Deformación total posición 2	51
Figura 82: Tensión de Von Mises soporte	52

TABLAS

Tabla 1: Resumen previo	7
Tabla 2: Especificaciones técnicas de imán D-70-45 [31].....	26
Tabla 3: Especificaciones técnicas de imán D-50-40 [32].....	26
Tabla 4: Identificadores de superficies y parámetros de malla:.....	29
Tabla 5: Propiedades Neodimio-N45.....	35
Tabla 6: Propiedades Neodimio-N52.....	35
Tabla 7: Propiedades Aire.....	35
Tabla 8: Asignación de materiales magneto-estático.....	37
Tabla 9: Propiedades mecánicas Neodimio [34]	45
Tabla 10: Propiedades mecánicas del aluminio 7075 [35] [36]	45
Tabla 11: Propiedades PA12 smooth [37] [38].....	45
Tabla 12: Asignación de materiales estático-estructural.....	47
Tabla 13: Características DIN 912 [28]	57
Tabla 14: Características DIN 125 [40]	57
Tabla 15: Características DIN 985 [41]	57
Tabla 16: Propiedades de coercitividad y remanencia de los imanes de Neodimio [42]	58

1 INTRODUCCIÓN

El sistema nervioso es uno de los más complejos y evolucionados del cuerpo humano, realiza múltiples funciones integrando la información que proviene del medio interno y externo, procesándola y elaborando una respuesta que permita organizar las funciones internas y también adaptarnos al medio que nos rodea.

El sistema nervioso está formado por dos tipos de células: las neuronas que son la unidad básica del SN encargadas de procesar y transmitir información a través de todo el sistema nervioso, se clasifican en sensitivas, motoras o interneuronas según su función y las células gliales que contribuyen al soporte estructural y funcional de las neuronas proporcionándoles nutrientes, recogida de residuos, guía para migraciones neuronales y tareas inmunológicas. Las células gliales son los oligodendrocitos, microglía, astrocitos y células de Schwann.

El sistema nervioso está integrado por el sistema nervioso central (SNC) formado por el encéfalo y la médula espinal, alojados y protegidos por el cráneo y columna vertebral respectivamente y el sistema nervioso periférico (SNP) que se divide en sistema nervioso somático y sistema nervioso vegetativo o autónomo.



Figura 1: Sistema nervioso central [1]

El encéfalo y la médula espinal se encuentran recubiertos por tres membranas: duramadre, aracnoides y piamadre, entre las que circula el líquido cefalorraquídeo.

El encéfalo lo forman el cerebro, cerebelo y bulbo raquídeo. El cerebro es la parte más importante entre sus funciones está la de controlar y regular el funcionamiento de los demás centros nerviosos, elabora respuestas conscientes y es el órgano de las facultades intelectuales: atención, memoria, inteligencia, etc. El cerebelo tiene como función principal coordinar los movimientos corporales y el bulbo raquídeo regula el funcionamiento del corazón, músculos respiratorios, deglución ...

La médula espinal es el centro de actos reflejos somáticos y vegetativos y es la vía de comunicación entre la periferia y el encéfalo a través de los nervios raquídeos.

El sistema nervioso periférico está formado por los nervios craneales y raquídeos que permiten la comunicación entre el medio externo o interno y el SNC. El sistema nervioso somático es el responsable de acciones voluntarias como el movimiento corporal y el sistema nervioso vegetativo o autónomo controla las funciones fisiológicas básicas e involuntarias como músculo cardíaco, músculo liso y glándulas de secreción [2]–[5].

Las enfermedades que afectan al sistema nervioso central y sistema nervioso periférico se denominan enfermedades neurológicas. En España se calcula que afectan a unos 7 millones de personas, lo equivalente al 16% de la población total. Entre las más frecuentes tenemos las demencias, ictus, epilepsia, Parkinson, esclerosis múltiple y migraña [6].

Consideramos la epilepsia una de las más relevantes por tratarse de un trastorno crónico que afecta a unos 50 millones de personas en el mundo según la OMS y produce un gran número de muertos [7].

La epilepsia es un trastorno neurológico desencadenado por el aumento de actividad eléctrica de un grupo de neuronas hiper excitables en alguna zona del cerebro. Se trata de una enfermedad crónica que se manifiesta en forma de convulsiones o movimientos corporales incontrolados denominados crisis epilépticas [8].

Desde 2005 la Liga Contra la Epilepsia (ILAE) define la epilepsia como un trastorno del cerebro caracterizado por una predisposición duradera a generar crisis epilépticas incluyendo de esta forma no sólo la presencia de crisis, sino también las repercusiones físicas, psicológicas y sociales de la misma.

Los casos de epilepsia en España según los datos de la Sociedad Española de Neurología (SEN) alcanzan unos 400.000 afectados. A nivel mundial se estima unos 50 millones de personas, y en Europa unos 6 millones de los que 100.000 casos corresponden a niños [9].

El estatus epiléptico (EE) en niños supone una urgencia neurológica que requiere un tratamiento inmediato porque puede conllevar la muerte o condicionar una morbilidad significativa. Es la emergencia neurológica pediátrica más común con una incidencia de 18-23 por cada 100 000 niños por año [10].

Por su cronicidad tiene una importante repercusión social, así lo destaca un estudio realizado en países europeos (Italia, España, Alemania, Holanda, Inglaterra, Portugal y Rusia), que confirman la exclusión social de los afectados, menor acceso a permisos de circulación, incluso limitaciones en prestaciones de compañías de seguros, además de los importantes costes económicos derivados de su enfermedad [11].

El diagnóstico de epilepsia se realiza en base a la clínica y a una serie de pruebas complementarias:

- Electroencefalograma (EEG) que permite analizar la actividad cerebral de una persona en tiempo real, una variante es la monitorización con vídeo-EEG continuo, un sistema que graba la imagen del paciente en sincronía con el registro digital de la actividad electroencefalográfica.
- Resonancia magnética cerebral (RMC) que permite identificar lesiones cerebrales causantes de epilepsia
- PET/SPECT utilizado para diagnóstico de epilepsias complejas ayudando a localizar las áreas cerebrales que originan las crisis.

En la actualidad contamos como medios para tratamiento de la epilepsia:

- Fármacos antiepilepticos (FAE): son el primer paso siempre asociado a pautas de estilo de vida adecuadas, fundamentalmente mantener una higiene de sueño correcta y evitar sustancias tóxicas. El tratamiento antiepileptico debe administrarse durante un tiempo más

o menos prolongado y no está exento de efectos adversos y en algunos casos requiere ensayos infructuosos con múltiples medicamentos. Estos fármacos están diseñados para restaurar el equilibrio químico de las neuronas y logran el control de crisis en aproximadamente entre el 70 y el 80% de las personas [12].



Figura 2: Fármacos [13]

- Cirugía: Algunos pacientes no logran remitir sus crisis epilépticas a través de tratamientos farmacológicos, por lo que los neurólogos deciden recurrir a las intervenciones quirúrgicas en las que se procede a extirpar parte del tejido cerebral, con lesión visible o sin ella, relacionado con el origen de las crisis epilépticas. La finalidad fundamental de la cirugía es curar la epilepsia o, si no es posible, convertir una epilepsia resistente o intratable en una epilepsia sensible o tratable [14].
- Estimulación del nervio vago (ENV): Se emplea en crisis focales sin lesión cerebral no controladas con medicación. Consiste en el envío de información al cerebro a través de leves pulsaciones eléctricas emitidas de forma regular [14].
- Inmunoterapia: Recientemente se ha aprobado la indicación de everolimus, fármaco inmunosupresor en pacientes con epilepsia por su efecto antitumoral y antiepileptico [15].
- Nuevas terapias:
 - Termo coagulación por radiofrecuencia guiada mediante SEEG, indicada en lesiones de difícil acceso quirúrgico y pequeña extensión.
 - Termoterapia con el empleo de láser guiado estereotáctica mente mediante RM cerebral, muy usado en EE. UU, pero sin aprobar en la Unión Europea.
 - Estimulación cerebral, utiliza técnicas de neuroestimulación que pueden ayudar a disminuir las crisis en algunos pacientes que no pueden beneficiarse de la cirugía o siguen teniendo crisis tras la intervención [15].

2 ESTADO DEL ARTE

Muchas personas logran un control satisfactorio de las crisis con medicamentos antiepilepticos, pero cerca de un tercio de las personas con epilepsia no toleran los efectos secundarios de la medicación o sufren crisis descontroladas y frecuentes. La cirugía es una opción para algunos pacientes con crisis descontroladas, pero no es adecuada para todos y es muy invasiva [9].

Gracias a la aparición de complejas técnicas de neuroimagen que revelan detalles del funcionamiento del cerebro humano como el electroencefalograma (EEG), el magnetoencefalograma (MEG), la tomografía por emisión de positrones (PET) o la resonancia magnética funcional (RMF), comienzan a realizarse estudios de estimulación cerebral. Los primeros fueron realizados por Fritsch y Hitzig, Ferrier realizó los primeros experimentos de localización funcional. Penfield y Jaspers consiguieron estimular el cerebro mediante electrodos para realizar el primer mapa intraoperatorio de áreas cerebrales. En la actualidad podemos comprobar y modificar funciones cerebrales de forma no invasiva aplicando campos magnéticos específicos (frecuencia e intensidad) emitidos desde el exterior del cuero cabelludo [16].



Gustav Fritsch
1838-1927

Eduard Hitzig
1838-1907

Figura 3: Gustav Fritsch y Eduard Hitzig [17]

La estimulación magnética transcraneal se muestra como uno de los tratamientos más recientes no invasivos que se puede ofrecer a personas con epilepsia, es una técnica de neuro modulación y neuroestimulación cerebral segura que podría facilitar la reorganización funcional cerebral. Utiliza el principio de inducción electromagnética descrito por Michael Faraday en 1831, que postula que un campo magnético variable en el tiempo puede inducir voltaje en un hilo conductor cercano como las neuronas corticales [18].

En 1985 Barker et al (Universidad de Sheffield) demostraron al colocar una bobina generadora de corriente eléctrica sobre la cabeza de un humano se evoca una respuesta motora pudiéndose evaluar de este modo la integridad de las vías motoras centrales. Desde su desarrollo, se ha utilizado en la investigación de afecciones cerebrales con potenciales usos terapéuticos. Pese a tratarse de una técnica novedosa desarrollada en los últimos años, su uso está muy extendido en Estados Unidos y comienza a utilizarse recientemente en la mayoría de los países europeos gracias a su certificación europea, aprobado por agencias internacionales de medicamentos (FDA) y la Comunidad Económica Europea, avalado por guías clínicas (NICE, CANMAT, NIMH...) [19].

Existen pocos ensayos clínicos que permitan evaluar la evidencia del uso de la estimulación magnética transcraneal repetitiva en personas con epilepsia, en comparación con otros tratamientos

disponibles en cuanto a la posible reducción de la frecuencia de las crisis, mejoría de la calidad de vida, la reducción de las descargas epileptiformes (anomalías en las pruebas electrográficas del cerebro que indican un trastorno cerebral subyacente o una tendencia a las convulsiones), el consumo de medicación antiepileptica y los efectos secundarios.

La última búsqueda de ensayos se realizó el 2 de junio de 2020. Se evaluó la evidencia de ocho ensayos controlados aleatorizados que incluyeron a 241 participantes y compararon la rTMS con tratamientos de control (tratamiento simulado, medicación antiepileptica o rTMS de baja frecuencia).

Algunos de los ensayos incluidos mostraron que la TMS reduce la cantidad de crisis que presentan los individuos. Cuatro ensayos mostraron una reducción en las descargas epileptiformes después del tratamiento con rTMS. En cuanto a los cambios en la calidad de vida siete participantes notificaron un aumento de las puntuaciones de calidad de vida con los tratamientos activos en comparación con los simulados. Los efectos secundarios fueron poco frecuentes, el notificado con más frecuencia fue el dolor de cabeza [20].

En febrero de 2023 en Santiago de Compostela el doctor Juan Casto Rivaduña profesor de Fisiología en la Universidad de Coruña, investigador en Neurociencia y doctor en Biología por la USC, explicó en una conferencia técnicas “no invasivas” para el tratamiento de la epilepsia. Este investigador tras “muchos experimentos” con ratones ha logrado confirmar que la estimulación magnética transcraneal contribuye a reducir la actividad cerebral. El estudio de dos grupos de ratones ha permitido observar que, en aquellos que no se someten a inducción magnética, las crisis se disparaban hasta el 90 por ciento de los casos, mientras que en los otros el porcentaje se reducía al 48 por ciento y los episodios eran más cortos. En humanos, de momento hay tres personas sometidas a este tratamiento con “cero efectos secundarios” y disminución de su actividad epiléptica [21].



Figura 4: Casco tratamiento transcraneal [22]

3 OBJETIVOS

En respuesta al creciente interés científico y clínico en estimulación magnética transcraneal no invasiva, y, debido a la escasa disponibilidad o existencia de equipos enfocados a la aplicación de este tipo de terapias, se decide llevar a cabo el desarrollo de un dispositivo seguro y eficiente para el tratamiento de la epilepsia en el ámbito clínico, además de contar con las dimensiones adecuadas para su utilización terapéutica en pacientes en edad pediátrica.

El dispositivo debe contar con una estructura ergonómica, teniendo en cuenta su resistencia mecánica y compatibilidad electromagnética.

Objetivos generales:

- Abordar aspectos técnicos, como la selección de materiales, la mejora del diseño y la evaluación de cargas y tensiones, para asegurar la calidad y seguridad del objetivo.
- Proponer un diseño final adaptado a los objetivos específicos.
- Elaborar planos detallados de los elementos en SolidWorks y AutoCAD.
- Crear un presupuesto en el que se estime el coste del proyecto.

Objetivos específicos:

- Equipo ergonómico.
- Diseño adaptable en altura y con posibilidad de rotación en varios ejes para mayor comodidad.
- Uso intuitivo y sencillo.
- Diseño adaptado para niños.
- Utilización de materiales no ferromagnéticos para evitar posibles interacciones con los campos generados por los imanes.
- Implementación de un sistema de regulación de altura para los imanes.
- Implementación de un sistema de seguridad para el encapsulado y correcto posicionado de los imanes.

4 DISEÑO CONCEPTUAL

Para este proyecto se parte de una posición fija de los imanes, siendo esta la misma que la de otros dos trabajos de final de grado, pertenecientes al alumnado de la Escuela de Ingeniería Industrial de la Universidad de Vigo. La potencia de dichos imanes está condicionada por la disponibilidad de componentes para este proyecto, por lo cual, los respectivos diseños de los diferentes modelos y sus análisis, tomando en consideración estos limitantes como base.

Teniendo esto en cuenta, el propio peso de los imanes supera los 10 kg, a lo que habría que sumar el resto de componentes, derivando esto en la necesidad de la inclusión de un soporte externo, ya que, este prototipo se orienta al uso en terapias para pacientes en edades cercanas a la niñez. Con todo, se considera fundamental llevar a cabo la implementación de un componente sobre el que recaiga este peso.

Para el proceso de fabricación de los modelos, es esencial el empleo de materiales que carezcan de propiedades ferromagnética, por lo cual, se utiliza una lista de alternativas potenciales, como el aluminio, el titanio o diversas alternativas en plásticos. En cuanto al soporte externo se valoran diferentes alternativas, ya sea fijo o móvil, que se describen en el apartado 5 de esta memoria.

Todos los condicionantes descritos anteriormente, han influenciado el diseño y desarrollo de diferentes prototipos, que abarcan tanto la configuración del casco como la disposición del conjunto de posicionadores. Dado que el diseño de estos últimos está ligado al desarrollo y forma del casco, resulta interesante describirlos en conjunto.

Las diversas versiones de prototipos que se presentan a continuación se componen inicialmente de su diseño, seguido por las propiedades distintivas de cada uno y las eventuales problemáticas que puedan surgir. La Tabla 1 muestra dicha descripción a modo de resumen previo.

Tabla 1: Resumen previo

Casco versión 1		Posicionadores versión 1	
Descripción	Problemas	Descripción	Problemas
Unión de elementos comerciales de aluminio con soldadura	Complejidad de fabricación y coste elevado	Regulación de altura de imanes en dos piezas independientes	Errores varios de diseño
<i>Segundo modelo</i>			
Casco versión 2		Posicionadores versión 2	
Descripción	Problemas	Descripción	Problemas
Rediseño de uniones y reducción de soldadura	Complejidad de fabricación y falta ergonomía	Rediseño total del casquillo posicionador	Ausencia sistema seguridad y longitud insuficiente
<i>Tercer modelo</i>			
Casco versión 3		Posicionadores versión 2	
Descripción	Problemas	Descripción	Problemas

Nuevo modelo partiendo bloque de Al mecanizado	Modelo no estético y peso excesivo	Idem	Idem
<i>Cuarto modelo</i>			
Casco versión 4		Posicionadores versión 3	
Descripción	Problemas	Descripción	Problemas
Reajuste estético y reducción de material	Necesidad de ligeros reajustes en la geometría	Reajuste de longitudes en ambos componentes	Derivados de la morfología del casco
<i>Modelo final</i>			
Casco versión final	Posicionadores versión final	Soporte	
Descripción	Descripción	Descripción	
Operaciones varias	Ligeros reajustes	Unir el casco con el soporte externo	

4.1 Primer modelo

4.1.1 Casco versión 1

4.1.1.1 Diseño

Para el primer modelo se busca una opción que incluya elementos comerciales, que requieran ligeras modificaciones y cuente con posibles uniones mediante soldadura.



Figura 5: Primer modelo

4.1.1.2 Descripción

Se seleccionan diámetros comerciales de tubo redondo de aluminio para este diseño, siendo los siguientes:

- Tubo de aluminio de 100 mm de diámetro interior y 5 mm de espesor que se usa para imanes de mayores dimensiones.
- Tubo de aluminio de 80 mm de diámetro inferior y 5 mm de espesor empleado para los imanes de menor dimensión.

Para las uniones, se opta por el diseño de piezas a medida, que consisten en piezas cortadas a láser y perfiles de aluminio también cortados a láser (ver Figura 6).

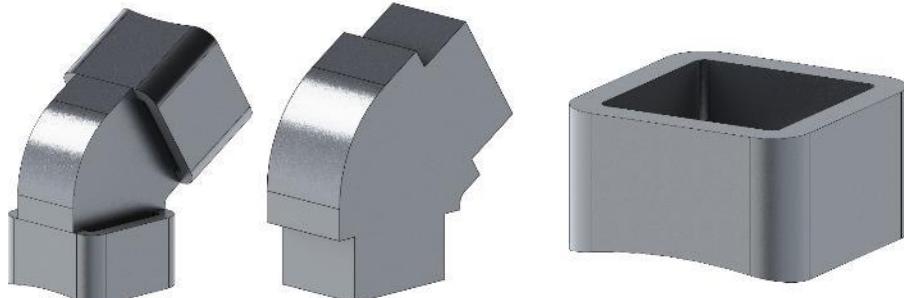


Figura 6: Unión entre tubos v1

Para las uniones entre las piezas se propone el uso de soldadura, abarcando tanto la conexión entre las propias uniones como su vinculación al tubo de aluminio.

Con el propósito de garantizar que las posiciones de los imanes coincidan con las requeridas, se desarrolla un bloque sólido que cumple la función de un "molde negativo". Este molde está diseñado específicamente para su fabricación mediante impresión 3D.

El principal propósito del "molde negativo" es colocar con precisión los tubos de aluminio para facilitar la ejecución de las soldaduras necesarias, asegurando así su disposición adecuada.

Se mantiene la posición exacta de los tubos, mientras se reserva el espacio necesario para el espesor correspondiente como se detalla en la Figura 7.

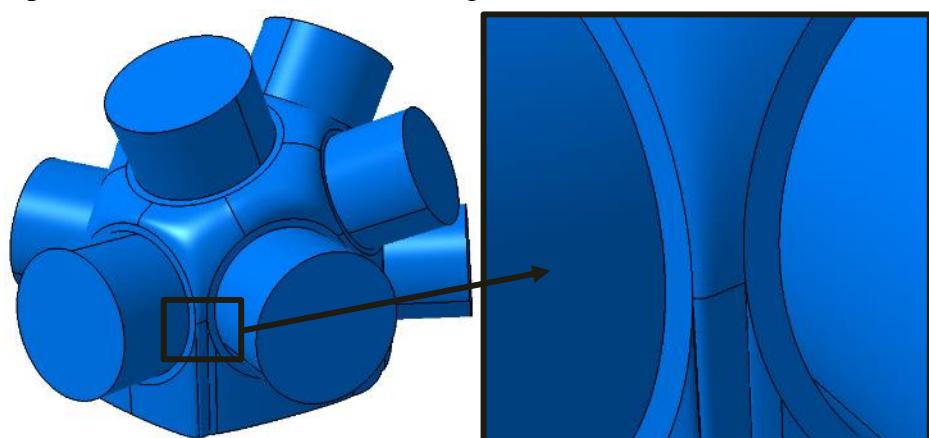


Figura 7: Negativo casco v1

El diseño inicial de las uniones que enlazan los tubos y forman la superficie se caracteriza por tener curvaturas, lo cual introduce geometrías complejas que pueden presentar problemas durante el proceso de impresión.

Considerando que se trata de un componente en forma de "negativo" y a fin de mantener una geometría lo más sencilla posible, se procede a modificar las uniones. Las curvas originales son reemplazadas por segmentos rectos, lo que resuelve el problema de las geometrías complicadas.

Este ajuste conduce a la corrección de las problemáticas previas y, como resultado, se logra una versión que resuelve los obstáculos encontrados en la iteración anterior.

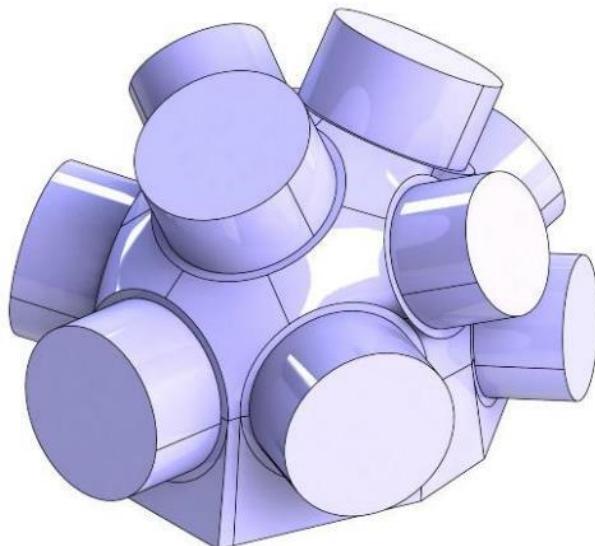


Figura 8: Negativo casco v2

En esta versión, la geometría se simplifica al máximo, las aristas se suavizan, se economiza el uso de material en las caras de unión y se acorta la longitud de los posicionadores de los tubos.

4.1.1.3 Detalles y problemas del modelo

- Uno de los mayores problemas presentes en este modelo es que al tratarse de tubos circulares situados en planos completamente distintos, el corte redondeado dado a los perfiles solamente se podría realizar en las uniones de las piezas centrales, ya que, para los tubos laterales, habría que realizar cortes muy complejos y exactos, lo cual incrementa el coste y crea zonas de amplia dificultad para el soldador.

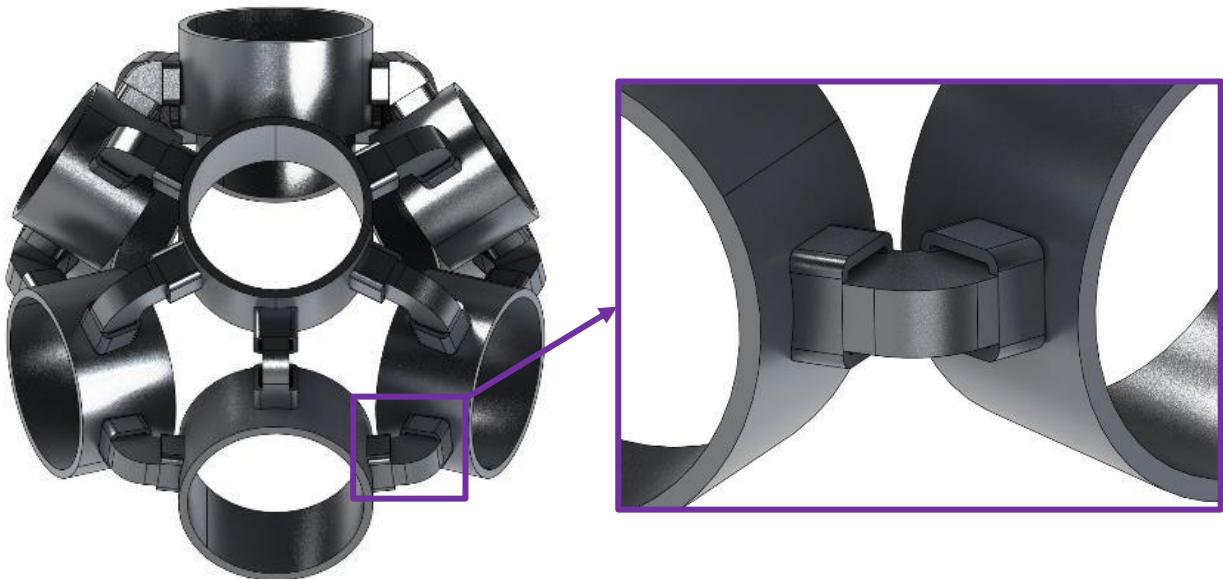


Figura 9: Problema pieza lateral

- Otro de estos problemas, también está relacionado con la soldadura, ya que, la longitud del cordón necesario para la unión mostrada en el detalle de la Figura 9, necesita unos 270 mm, haciendo esto un total de 4.6 m aproximadamente para todas las uniones. Se considera excesivo tanto a nivel de material necesario, como de horas de soldadura, siendo esto un factor diferencial a la hora de descartar este modelo.
- El tercer problema es que no se podría acoplar correctamente un soporte para el dispositivo.

4.1.2 Conjunto de posicionadores versión 1

4.1.2.1 Diseño

En orden de cumplir con el requerimiento de permitir la regulación de la altura de los imanes, se necesita el diseño de un componente que permita la correcta colocación de los mismos.

Por lo tanto, se propone una primera versión en dos piezas independientes, encajando estas mediante rosca, permitiendo de esta manera la regulación en altura de los imanes sin mayores dificultades mostrándose esta en la Figura 10.



Figura 10: Conjunto de posicionadores v1

4.1.2.2 Descripción

El diseño de este conjunto se realiza en dos tamaños diferentes, uno correspondiente a cada diámetro de imán. Se diseñan de la siguiente manera:

- La pieza en la cual se embute el imán se denomina casquillo roscado (Figura 10 izquierda), mientras que la pieza en la que enrosca y va situada en el casco se denomina cilindro posicionador (Figura 10 derecha).
- El diámetro exterior del cilindro posicionador está limitado por el diámetro del tubo de aluminio comercial mencionado en el apartado 4.1.1.2, restándole 0.4 mm a modo de tolerancia, para que tenga un encaje más suave. En la parte superior cuenta con un escalón que hace la función de tope de seguridad, evitando que esta pieza pueda deslizar hacia la zona interior del casco.
- El diámetro interior del casquillo roscado, también está limitado a su vez por el diámetro de los imanes comerciales mencionados en el apartado 5.3.2. En este caso se aumenta el diámetro 0.4 mm para un encaje más suave.
- Para cada juego de posicionadores el espesor de cada componente del conjunto es de 15 mm aproximadamente.
- Al casquillo roscado se le añade una extrusión, con el fin de que actúe como regulador manual para la altura del imán de manera sencilla. Se añade una segunda extrusión interior que permite el uso de una llave en caso de que se atore el propio casquillo. Ambas detalladas en la Figura 11.
- Se utiliza un paso de rosca de 5 mm, que permite una mayor precisión para la colocación de los imanes.



Figura 11: Detalles casquillo roscado

4.1.2.3 Detalles y problemas del modelo

Esta versión cuenta con los siguientes problemas:

- En primer lugar, con esta configuración la embutición del imán es una tarea compleja, debido a que, al no disponer de ningún orificio para la extracción del aire y el ajuste por apriete, se produce un incremento de presión en la región encerrada entre el imán y el casquillo, aumentando la dificultad en la correcta colocación del mismo. A su vez, en el momento que se introduce el imán, no es posible sacarlo a menos que se produzca la rotura de la pieza. Esto no es nada útil en caso de que se requiera el cambio del imán o la propia pieza.
- El segundo problema que se encuentra es en la extrusión para la regulación de altura. Esta cuenta con unas dimensiones inadecuadas, tanto para el diámetro como para la longitud, siendo estas menores a las requeridas para la comodidad del usuario.
- El tercer problema está interrelacionado con el segundo, ya que, la extrusión para el uso de la llave se encuentra en el interior de la extrusión de regulación, por lo tanto, cuenta con un diámetro inferior al requerido para la introducción de dicha llave de manera segura.
- Por último, aunque se trate de una impresión mediante sinterizado láser y la precisión sea del orden de ± 0.1 mm, al tratarse de un paso de rosca estrecho y debido a la longitud de la pieza, a la hora de la realizar la impresión se obtiene un componente que tiene un encaje correcto en la primera región de roscado, pero se va encareciendo a medida que se introduce dicha pieza, lo cual es altamente perjudicial.

4.2 Segundo modelo

4.2.1 Casco versión 2

4.2.1.1 Diseño

Para este nuevo modelo, se mantiene como base el uso de componentes independientes unidos mediante soldadura, por lo que se modifican las uniones entre los tubos, obteniéndose el resultado mostrado en la Figura 12.



Figura 12: Segundo modelo

4.2.1.2 Descripción

- Las uniones entre los tubos se rediseñan, reduciendo la complejidad y la cantidad de soldadura necesaria en un 75%.
- Las piezas se modelan con el objetivo de fabricarse mediante corte a láser a partir de una placa de aluminio de 15 mm de espesor, mediante el siguiente proceso de diseño:
 - Se adopta una forma triangular para reducir la cantidad de piezas y aumentar la zona de contacto entre ellas mostrado en la Figura 13 izquierda.
 - Se establece un punto de contacto objetivo en el arco de la pieza de unión como se puede apreciar en la Figura 13 centro.
 - El radio del arco incluye una separación desde la zona inferior de la pieza de unión al tubo, que se rellena mediante cordón de soldadura, facilitando a su vez este proceso.

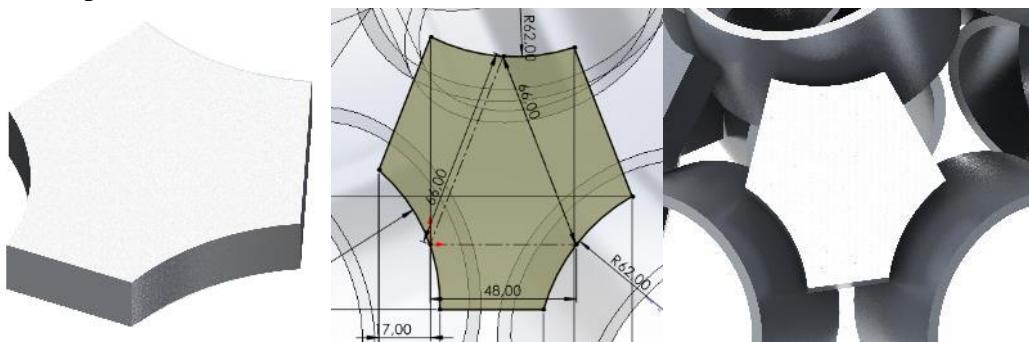


Figura 13: Unión entre tubos v2

- Se incorpora además una pieza adicional para unir el casco y su soporte, soldada entre los dos tubos centrales superiores mostrada en la Figura 14.



Figura 14: Unión entre tubos v2

4.2.1.3 Detalles y problemas del modelo

- A pesar de las mejoras en la simplificación y reducción de la soldadura, al consultar con empresas manufactureras, se concluye que este modelo continúa siendo demasiado complejo y no pueden asegurar una fabricación viable.
- El diseño no cumple con los requisitos de ergonomía y estética previamente establecidos, para lo cual se propone la creación de una cobertura externa e interna mediante impresión 3D, con el propósito de cumplir con estas demandas. Se descarta esta solución debido a que produce un sobrecoste.

4.2.2 Conjunto de posicionadores versión 2

4.2.2.1 Diseño

El diseño anterior queda descartado debido a los múltiples problemas expuestos. Se mantiene el diseño base realizando unos pequeños ajustes, mostrándose el resultado en la Figura 15.



Figura 15: Conjunto de posicionadores v2

4.2.2.2 Descripción

En esta segunda versión se les da solución a los problemas resultantes en la primera versión, mostrándose todos estos cambios en la Figura 16:

- Se realizan 4 orificios en la parte superior del casquillo posicionador, permitiendo el paso del aire y que soluciona el exceso de presión producido tras la embutición del imán en la cavidad. Esto también permite la extracción del imán, facilitando posibles labores de mantenimiento como el reemplazo del mismo o del propio casquillo.
- Se aumenta la longitud y el diámetro de la extrusión para la regulación de altura, aumentando de esta manera el confort para el usuario y solucionando el problema de la versión previa. Al aumentar este diámetro también se aumenta el diámetro interior, permitiendo así la introducción de la llave mencionada anteriormente.
- Por último, se aumenta el paso de rosca, pasando este de 5 a 7 mm, evitando así posibles problemas de roscado debido a la impresión, además de dejar 1 mm de diferencia entre el diámetro exterior del casquillo roscado y el diámetro interior del cilindro posicionador.



Figura 16: Comparación casquillo roscado v1 vs v2

4.2.2.3 Detalles y problemas del modelo

A pesar de las mejoras propuestas, este modelo sigue contando con los siguientes problemas:

- No cuenta con un sistema de seguridad que impida que el casquillo salga por la parte interior del cilindro posicionador debido a un mal uso del usuario.
- El recorrido total es inferior al deseado, impidiendo la correcta colocación de los imanes y a pesar del aumento de las dimensiones de la extrusión para regulación de altura, no se satisfacen al completo los requisitos de fácil uso y confort debido a esto.

4.3 Tercer modelo

4.3.1 Casco versión 3

4.3.1.1 Diseño

Partiendo de la base del segundo modelo, surge una nueva propuesta de diseño alternativa que implica el uso de un macizo de aluminio como punto de partida. Para este diseño se propone el empleo de mecanizado, dejando a un lado la utilización de componentes independientes unidos mediante soldadura.

Con este método se incrementa la resistencia estructural, además de eliminar la necesidad de la impresión del "molde negativo", ya que con el uso de mecanizado no se necesita ningún tipo de aparato de alineación para los orificios donde se sitúa el conjunto de posicionadores.



Figura 17: Tercer modelo

4.3.1.2 Descripción

En este nuevo diseño, se han solventado los problemas detectados en los diseños anteriores.

- Se elimina por completo la soldadura al aprovechar un bloque inicial de aluminio, que es posteriormente sometido a procesos de mecanizado para lograr la forma requerida.
- La impresión del "molde negativo" para la alineación de los tubos ya no es necesaria.
- Este enfoque representa una mejora desde la perspectiva estructural, dado que la densidad de material uniforme reduce los picos de tensión en áreas localizadas.
- Se logra una notable mejora ergonómica gracias a un soporte interior en este diseño macizo. Esta mejora elimina la necesidad de diseñar e imprimir una carcasa interna, considerándose incluso la adición de material acolchado para mayor comodidad.

4.3.1.3 Detalles y problemas del modelo

El principal problema de este diseño se muestra en la Figura 18, pues se obtienen formas muy rectas, sin esquinas suavizadas y con formas muy abruptas. Como resultado, se obtiene un modelo que requiere el empleo de abundante material, derivando esto en un peso excesivo de unos 20 kg aproximadamente.

Debido a esto, no se cumple con los requisitos estéticos deseados y además al emplear una gran cantidad de material se encarece el precio innecesariamente.



Figura 18: Exterior tercer modelo

4.4 Cuarto modelo

4.4.1 Casco versión 4

4.4.1.1 Diseño

En vista de los problemas presentados por el anterior modelo, es necesario un remodelado total de la parte externa del casco, visualizándose este en la Figura 19.



Figura 19: Cuarto modelo

4.4.1.2 Descripción

Se puede apreciar a simple vista en la comparación realizada en la Figura 20, que el diseño está suavizado, siendo un 34.65% más ligero, derivando esto en una geometría un 32% menos voluminosa, por lo tanto, más compacta.

Esto se debe principalmente a la reducción en la longitud de la zona de alojamiento de los imanes, además de un suavizado total en las aristas superiores e inferiores.



Figura 20: Comparación de casco v3 vs casco v4

4.4.1.3 Detalles y problemas del modelo

Este modelo cuenta con pequeños detalles como los siguientes:

- El escalón de apoyo no tiene un espesor constante, creándose zonas con espesores mínimos, no siendo visualmente estético como se puede apreciar en la Figura 21 izquierda.
- Las longitudes de las zonas de alojamiento del conjunto de posicionadores no están unificadas, siendo diferentes para el mismo diámetro de orificio, implicando esto la necesidad de diseñar juegos con diferentes dimensiones para cada tipo de imán.
- A pesar de haber suavizado la geometría y optimizado la misma, las aristas inferiores no acaban de seguir la línea de la parte superior del modelo, siendo antiestético, además de contar con zonas de espesor reducido en los orificios pertenecientes a la parte inferior, mostrándose en la Figura 21 derecha.
- A mayores se añade un nuevo requerimiento, implicando este la adicción de un sistema de seguridad que evite que el cilindro posicionador se deslice hacia la parte exterior del casco, no siendo suficiente el sistema ya presente para la zona interior.

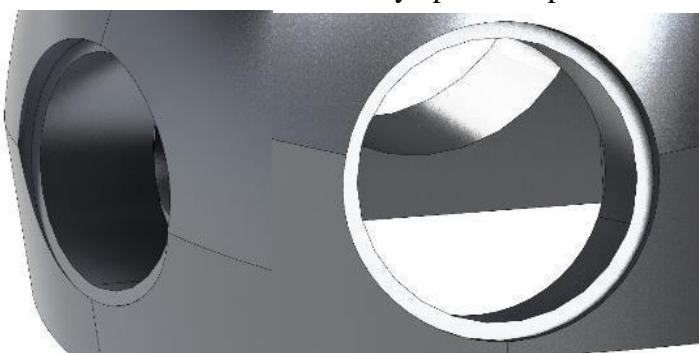


Figura 21: Detalles modelo 4

4.4.2 Conjunto de posicionadores versión 3

4.4.2.1 Diseño

Debido a la problemática encontrada en el conjunto de posicionadores v2 descrita en el apartado 4.2.2.3, se realizan una serie de cambios mostrados en la Figura 22.

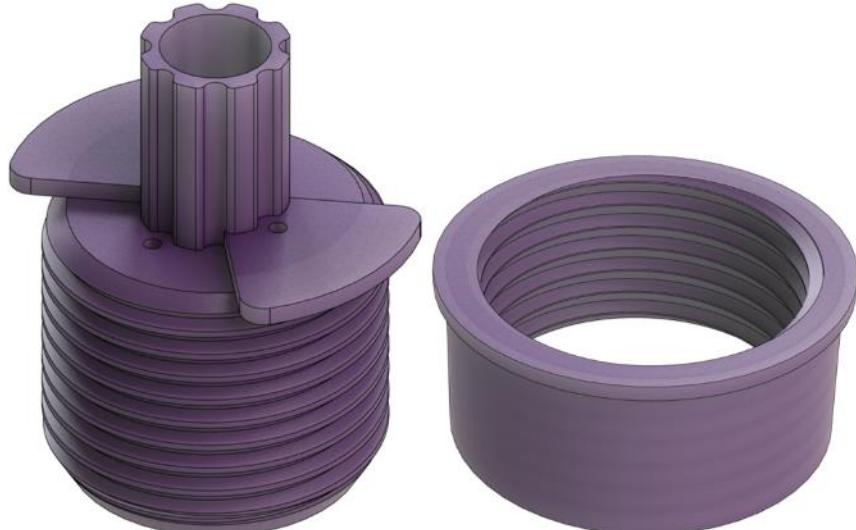


Figura 22: Conjunto de posicionadores v3

4.4.2.2 Descripción

Los cambios aplicados a este nuevo modelo son:

- Se añaden dos extensiones de material en la parte superior del casquillo roscado. Estas cumplen con la función de tope de seguridad, evitando de esta manera posibles deslizamientos del casquillo roscado hacia la zona interior del casco.
- Se incrementa la longitud del casquillo roscado, permitiendo un mayor recorrido del mismo en el interior del casco, y limitándose este con mayor precisión debido al tope de seguridad.

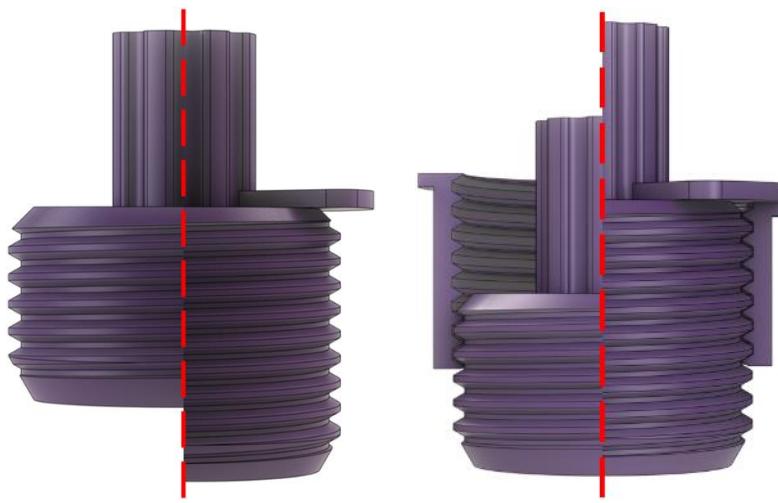


Figura 23: Comparación casquillo roscado v2 vs v3

4.4.2.3 Detalles y problemas del modelo

Este modelo no presenta problemas aparentes derivados de su propia morfología. El único inconveniente que pueden presentar viene dado por el diseño asociado al casco, siendo este la falta de unificación en cuanto a las longitudes del cilindro posicionador para el mismo tamaño de imanes. Esto puede ocasionar, que, al no tener una longitud concreta y unificada, se tengan que hacer varios diseños y que no todos los posicionadores tengan la misma longitud interna.

4.5 Versión final

4.5.1 Casco versión final

4.5.1.1 Diseño

En esta versión final, se tienen en consideración los detalles mencionados en el apartado 4.4.1.3, por lo que utilizando como base este modelo, se realizan pequeñas modificaciones que dan como resultado el observado en la Figura 24.



Figura 24: Modelo final

4.5.1.2 Descripción y detalles del modelo

Las modificaciones y soluciones realizadas en este modelo son las siguientes:

- Se unifican las longitudes internas de los orificios destinados a la colocación del conjunto de posicionadores, siendo de 43 mm para el juego de 70 mm de diámetro y de 46 mm para los de 50 mm de diámetro.
- Se incorpora el sistema de seguridad mencionado en el apartado 4.4.1.3, rodeado en rojo en la Figura 25. Este consiste en una extrusión simple realizada en la región media del interior de los orificios destinados a la ubicación del conjunto de posicionadores, y al combinarlo con el nuevo diseño del cilindro posicionador mostrado en el apartado **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, evita la posibilidad de que este se deslice hacia la parte exterior. De esta manera y en conjunto con el sistema ya existente, asegura la perfecta fijación y evita el posible movimiento de este componente hacia la zona interior o exterior del casco.
- Se realizan cuatro orificios de ventilación en el diseño, mostrados en la comparación de Figura 25 en la esquina superior derecha. Estos buscan facilitar el intercambio de aire entre las partes internas y externas del "casco". Este flujo de aire tiene como objetivo primordial optimizar el bienestar térmico de los pacientes, al promover un ambiente más fresco y cómodo, se contribuye a una experiencia de terapia más agradable, se disminuye la sudoración y se previenen los posibles inconvenientes asociados con la exposición prolongada al calor.

- Se aumenta el espesor de la zona inferior respecto al anterior apreciándose en la comparación de la Figura 25 en la esquina superior izquierda, acompañado de un rediseño completo de esta zona además de un suavizado de la totalidad de la geometría.
- Por último, se realiza un corte ranurado junto con dos taladros en la sección superior del casco, mostrados en la Figura 25 inferior. Estos últimos se destinan a la incorporación de un soporte externo que funcionará como conexión entre el casco y su respectivo soporte, dejando que el tornillo penetre unos 24mm, estando diseñado para la introducción de tornillos DIN 912 de M12. Las dimensiones del ranurado son de 120 x 40 mm, con un radio de 10 mm para las 4 esquinas mostrado en el detalle de la Figura 26.



Figura 25: Detalles modelo final

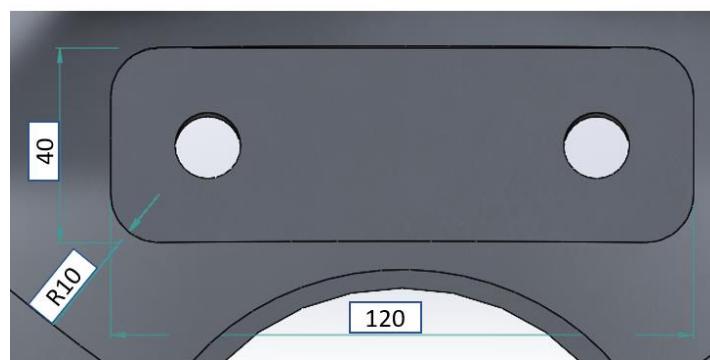


Figura 26: Dimensiones ranura

4.5.2 Conjunto de posicionadores versión final

4.5.2.1 Diseño

Se realizan los ajustes necesarios, obteniendo como resultado final el conjunto mostrado en la Figura 27.

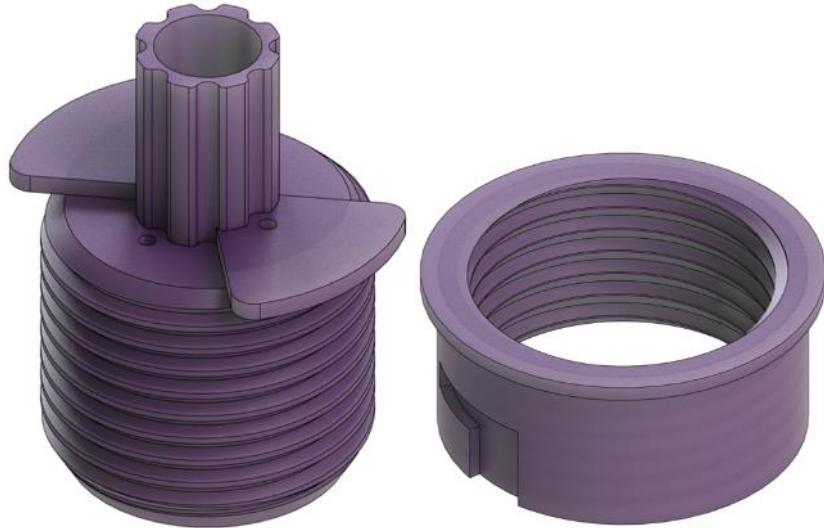


Figura 27: Conjunto de posicionadores final

4.5.2.2 Descripción y detalles del modelo

En esta versión final, se realizan los siguientes ajustes:

- El casquillo rosado no sufre apenas modificaciones, simplemente se reajusta su longitud en caso de ser necesario debido a la unificación de medidas para los cilindros posicionadores mencionadas en el primer punto del apartado 4.5.1.2. Debido a la extrusión añadida en la parte superior se limita la distancia que penetran internamente, siendo de 28 mm para el conjunto de posicionadores de mayor tamaño y de 30 mm para el juego de menor tamaño.
- El cilindro posicionador sí que requiere de un ligero rediseño de la zona exterior, para adaptarse de esta manera al nuevo sistema de seguridad implementado. Esta modificación consiste en dos cortes en la zona externa, de forma que permitan posicionar en su interior la extrusión de material perteneciente al casco. En la Figura 28 se muestra el recorrido que debe seguir a la hora de introducirse en el casco. De esta manera, cuando la extrusión del casco se aloja en la zona final del tramo, esto hace de fijación para evitar el deslizamiento de este componente hacia la zona exterior, además de, servir como refuerzo adicional para evitar este suceso a la inversa.



Figura 28: Detalles cilindro posicionador

4.5.3 Soporte de unión

4.5.3.1 Diseño

Este componente se modela únicamente para la versión final, obteniéndose el resultado mostrado en la Figura 29.



Figura 29: Soporte de unión

4.5.3.2 Descripción y detalles del modelo

Este modelo hace la función de conexión entre el casco y la grúa que se destina al soporte del mismo. Este cuenta con:

- Se diseña para ser mecanizada a partir de un macizo de aluminio, evitando así procesos de soldadura, mejorando la resistencia estructural y evitando posibles tensiones acumuladas en el cordón de soldadura.
- Sus dimensiones encajan a la perfección en el hueco descrito en el último punto del apartado 4.5.1.2. Estas son las mostradas en la Figura 30, y difieren en un 1mm con respecto al hueco. Con este margen se da una tolerancia de 0.5 mm por lado, dando así espacio suficiente para el correcto posicionado de los tornillos.

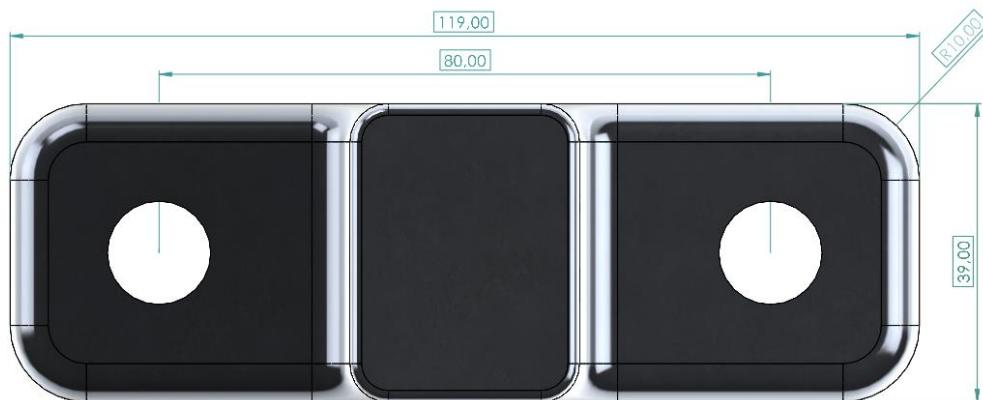


Figura 30: Dimensiones soporte de unión

5 DISEÑO DE DETALLE

5.1 Material

Como se pide en los requerimientos se utilizan materiales no ferromagnéticos, siendo los escogidos los siguientes:

5.1.1 PA 12

Es el material seleccionado debido a unas propiedades mecánicas sobresalientes, lo que lo hace sumamente versátil. Además, presenta alta resistencia a la fatiga, así como buena resistencia al impacto y al desgaste [23].

Para este caso se utiliza el polvo de poliamida, ya que la impresora con la que se cuenta es de sinterizado láser. La seleccionada es la del suministrado filament2print de la marca Sinterit. Esta además de contar con las propiedades mencionadas anteriormente, se trata de la variante “smooth”, que cuenta con un acabado superficial fino y suave al tacto, sin necesidad de un post procesado, favoreciendo esto en una mayor calidad en pequeños detalles [24]



Figura 31: PA12 smooth [25]

5.1.2 Aluminio 7075

Este material es el seleccionado para las piezas mecanizadas, más concretamente el casco (Casco versión) y el soporte de unión (Soporte de unión). Debido a su bajo coste y sus buenas propiedades mecánicas, satisface a la perfección las necesidades de este proyecto. En concreto debido a su alto límite elástico, su baja densidad y coste hace que sea perfecto para este proyecto.

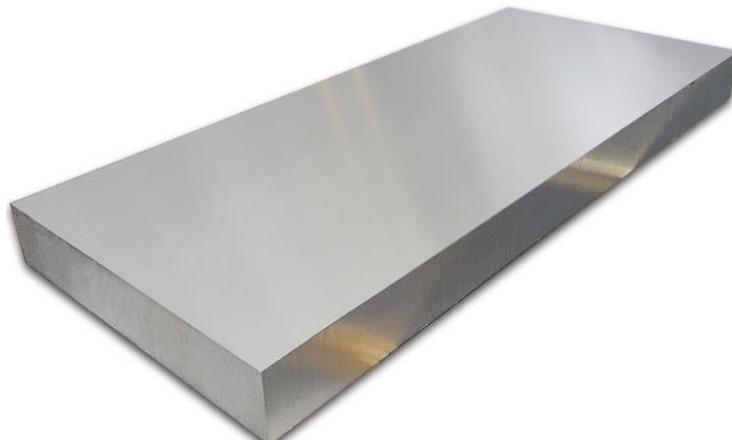


Figura 32: Dimensiones soporte de unión [25]

5.2 Tornillería

5.2.1 Tornillo DIN 912 de titanio

Utilizados para unir el soporte de unión (Soporte de unión) al casco (Casco versión) a través de los orificios realizados para el alojamiento de estos. Solamente es necesario la utilización de dos tornillos de M12 y 70 mm de longitud.



Figura 33: DIN 912 [26]

5.2.2 Tuerca autoblocante DIN 985 de titanio

Utilizados como fijación para los tornillos mencionados en el punto anterior. Por ende, solamente son necesarias dos unidades de M12.



Figura 34: DIN 985 [27]

5.2.3 Arandela DIN 125 de titanio

Se utiliza para aliviar las posibles tensiones que se puedan ocasionar en la zona de contacto entre la tuerca y el soporte. De esta manera, solamente son necesarias dos unidades, también de M12.



Figura 35: DIN 125 [28]

5.3 Elementos comerciales

5.3.1 Grúa para minusválidos

Previo a la selección de la alternativa definitiva, se procede a una evaluación de diversas opciones. Se inicia este proceso considerando la viabilidad de incorporar un dispositivo de montaje en pared, similar a los secadores de cabello convencionales. No obstante, esta opción es descartada en virtud de que un enfoque móvil resulta más apropiado, dado que no requeriría la asignación de un espacio íntegro y reservado únicamente para su utilización.

Otra posibilidad contemplada consiste en el desarrollo de un diseño completamente nuevo; sin embargo, debido al incremento de costes tanto en material como en horas de diseño, se desestima esta opción.

Finalmente, se llega a la conclusión de que la alternativa más viable consiste en seleccionar un elemento comercial que se adapte a estas características. Con este en mente, se opta por la opción de una grúa para personas con movilidad reducida.

Esto es debido a que se trata de un instrumento médico, lo cual asegura su conformidad con las dimensiones predefinidas para permitir su circulación en el entorno hospitalario, facilitando así su transporte y ajuste.

Tras contactar con varios suministradores, se selecciona la opción distribuida por DORTOMEDICAL, siendo esta opción la que mejor calidad-precio arroja, soportando 180 kg de máximo y contando con todas las licencias necesarias para su uso en el ámbito médico.



Figura 36: Grúa para minusválidos [29]

5.3.2 Imanes

Se emplean imanes cilíndricos de Neodimio comerciales, presentando distintas especificaciones en cuanto a su diámetro, altura y fuerza magnética. Estos vienen codificados mediante una letra seguida por dos dígitos "X -00". La letra puede variar, variando entre N, M, H, SH, UH o EH, y denota la temperatura máxima de operación. Mientras tanto, los dígitos, que varían en el rango de 35 a 55, reflejan el valor energético máximo del imán en MGoe, equivalente a la potencia magnética del imán [30].

El suministrador de estos imanes es superimanes.com y siendo los modelos seleccionados y sus características las siguientes:

- D-70-45:

Tabla 2: Especificaciones técnicas de imán D-70-45 [31]

Material	Neodimio (NdFeB)
Forma	Disco redondo
Diámetro	70 mm
Alto	45 mm
Tolerancia	+/- 0.1 mm
Sentido de magnetización	Axial (paralelo al alto)
Revestimiento	Niquelado (Ni-Cu-Ni)
Magnetización	N52
Fuerza de sujeción	300 kg
Temperatura de servicio máxima	60°C
Peso	1.314 kg

- D-50-40:

Tabla 3: Especificaciones técnicas de imán D-50-40 [32]

Material	Neodimio (NdFeB)
Forma	Disco redondo
Diámetro	50 mm
Alto	40 mm
Tolerancia	+/- 0.1 mm
Sentido de magnetización	Axial (paralelo al alto)
Revestimiento	Niquelado (Ni-Cu-Ni)
Magnetización	N45
Fuerza de sujeción	170 kg
Temperatura de servicio máxima	80°C
Peso	0.590 kg

6 CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS

Los cálculos explicados a continuación se realizan para dos posiciones diferentes de los imanes, siendo la primera estando la cara del imán más próxima a la cabeza sin sobresalir por la parte interior del casco, mientras que en la segunda la posición será la máxima permitida por el posicionador.

6.1 Arreglo de geometría

Para evitar problemas a la hora de realizar el mallado y las simulaciones, se realizan diversas simplificaciones a la geometría.

6.1.1 Simplificación casco

A la hora de simular el casco, solamente se realiza una simplificación, eliminando por completo los topes, ya que al tratarse de elementos de pequeño tamaño y dado a que su implicación en el análisis estructural es mínima. Se opta por suprimirlos y evitar posibles problemas a la hora de mallar y de simular, obteniéndose el siguiente resultado:

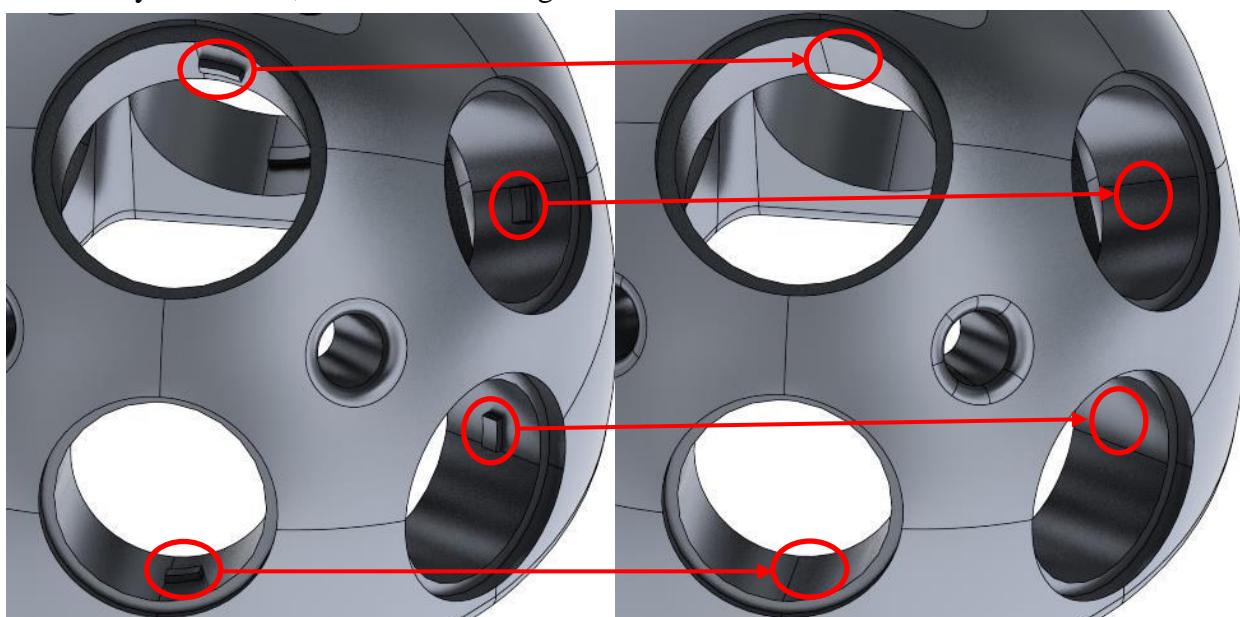


Figura 37: DIN 912

6.1.2 Simplificación del conjunto de posicionadores

Cuando se trata del conjunto de posicionadores, se realizan algunas simplificaciones para evitar complicaciones innecesarias. Dado que se trata de un componente compuesto por dos partes y no se requiere un análisis exhaustivo de las roscas, se opta por fusionarlas en una sola entidad. Esto permite centrarse únicamente en la fuerza ejercida por el imán sobre dicha entidad y, a su vez, por esta sobre el casco.

Adicionalmente, se han excluido las muescas previamente diseñadas para encajar con el tope del sistema de seguridad incorporado en el casco. Puesto que estas muescas no aportan nada al cálculo en cuestión, su presencia solo encarece de manera innecesaria la complejidad de los análisis.

Por último, se ha reducido de manera considerable la extensión del casquillo roscado utilizado para alojar el imán, dado que tampoco es esencial para los cálculos requeridos. Esto resulta en que la altura de esta parte se ajusta para ser igual a la del cilindro posicionador, y su grosor varía en función de la posición del imán.

Tomando en consideración todo lo expuesto previamente, se obtiene el siguiente resultado:



Figura 38: Conjunto simplificado posición 1

En relación a la segunda posición, se aplica la misma simplificación que en el caso anterior, con la diferencia en la zona del casquillo roscado que se extiende desde la parte inferior del cilindro posicionador. En esta zona, el diámetro de esta zona coincide con el de la rosca exterior del casquillo. Además, se respeta el chaflán en la zona final del casquillo, ya que el diseño original incorpora esta característica para prevenir posibles colisiones entre las piezas una vez que todas se encuentren en la posición 2.



Figura 39: Conjunto simplificado posición 2

6.1.3 Soporte

Para este componente se realiza una ligera simplificación mediante el aumento de las dimensiones de su base, que pasa de medir 119x39 a 120x40, permitiendo un ajuste correcto con el casco. Esta modificación previene la formación de espacios estrechos, de tan solo 0.5 mm, entre el soporte y el casco. La existencia de tales huecos de dimensiones mínimas complicaría las simulaciones y los cálculos sin aportar ningún valor adicional a la representación. En consecuencia, se opta por esta simplificación.

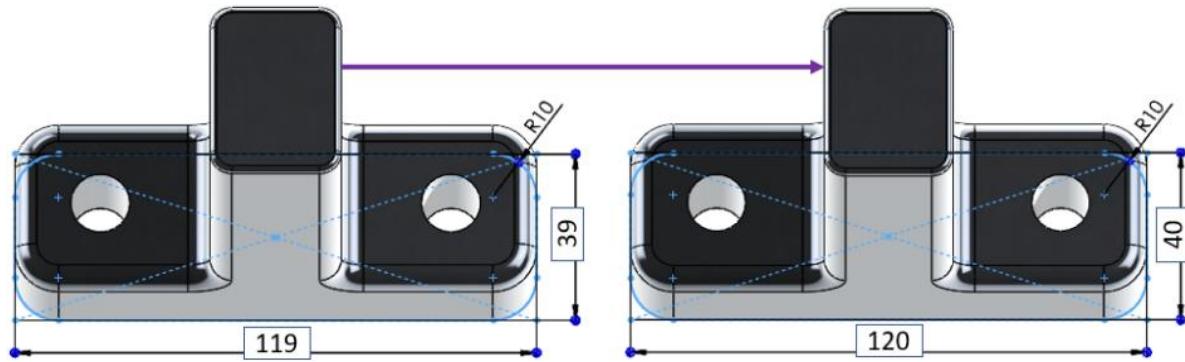


Figura 40: Soporte simplificado

6.2 Mallado

Para el proceso de mallado se utiliza la estructura simplificada. Para la creación de la misma, se utiliza CATIA, Hypermesh y ANSYS Fluent Meshing.

Este proceso solo aplica a la malla utilizada para las simulaciones de análisis estructural estático, ya que, debido a problemas de incompatibilidad en ANSYS, no se pueden utilizar estas mallas para el análisis magneto-estático como se explica en profundidad en el apartado 6.3 Análisis magneto-estático.

6.2.1 Preparación premallado

Una vez se tiene la geometría simplificada, se exporta a formato “. step” para poder trabajar con ella en CatiaV5, esto es debido a que se tiene la geometría como un conjunto de sólidos con volumen y este proceso de mallado se va a realizar mediante superficies.

CatiaV5 es la herramienta que mejor se adapta a los requisitos, ya que, gracias a su “generative Surface module” se pueden extraer de manera muy simple las superficies con las que se quiere trabajar.

6.2.2 Mallado bidimensional en Hypermesh

Con las superficies ya extraídas, se realiza el mallado de la geometría en Hypermesh 2D. Se utiliza esta aplicación, ya que permite realizar una malla superficial controlada y refinada en cada cara.

Se preparan las superficies y se agrupan en diferentes dominios, de esta manera, se facilita el trabajo a la hora de mallar los diferentes elementos, realizando una malla más fina donde se requiera, y más gruesa donde sea menos importante.

En la Tabla 4 se muestra el color con el que se identifica cada superficie y los parámetros de malla utilizados, mientras que en la Figura 41 se muestran las superficies con sus respectivos colores.

Tabla 4: Identificadores de superficies y parámetros de malla:

Superficie	Parámetro de malla [mm]	ID
w-m-casco	4	Red
w-m-casco-interior	2	Cyan
w-m-casco-taladros	2	Purple
w-m-imán	3	Magenta
w-m-posicionador	3	Light Green
w-m-soporte	2	Pink
w-m-posicionador-interior	2	Light Orange
w-mm-casco-vs-posicionador	2	Dark Blue
w-mm-casco-vs-soporte	2	Teal
w-mm-posicionador-vs-imán	2	Yellow

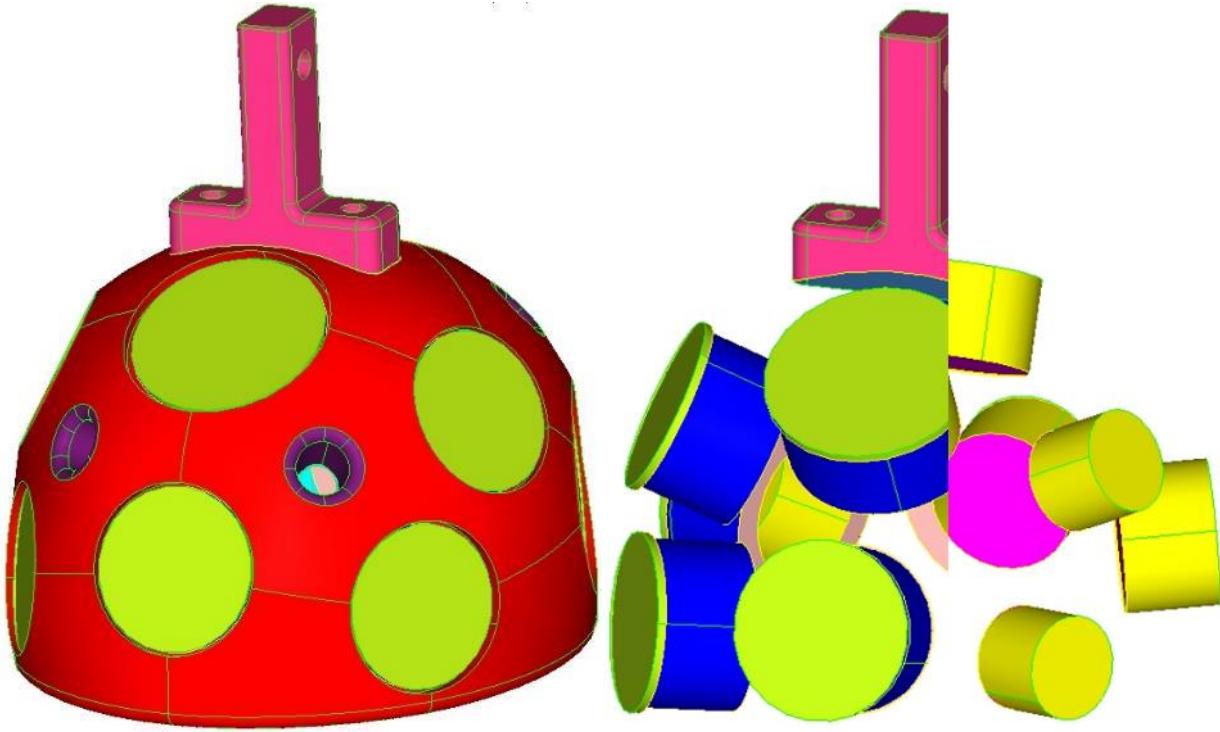


Figura 41: Superficies Hypermesh

Para la realización de la malla, se utilizan elementos triangulares. En este proceso, se consideran principalmente dos parámetros que inciden en la calidad y precisión de la discretización del dominio:

- Aspect Ratio: Relación entre el lado más largo de un elemento y su lado más corto o la distancia más corta desde un nodo de esquina al borde opuesto, esto se denomina altura mínima normalizada (MNH). Hypermesh calcula la distancia perpendicular de cada nodo de esquina (i) al rayo que incluye el cateto opuesto del triángulo $h(i)$. Esto se multiplica por un factor de escala que asegura que cuando se trata de un triángulo equilátero la MNH sea la del lado mínimo [33]. La fórmula es la siguiente:

$$MNH = \min(h_i) * 2 / \sqrt{3} \quad \text{Ecuación 1}$$

- Skewness: La inclinación de los elementos triangulares se calcula hallando el ángulo mínimo entre el vector de cada nodo al lado medio opuesto y el vector entre los dos lados medios adyacentes en cada nodo del elemento[33].

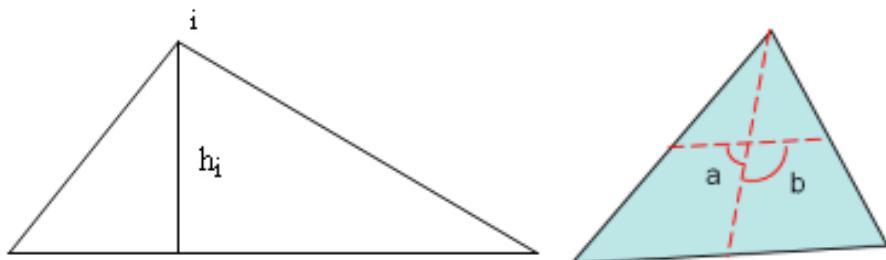


Figura 42: MNH y Skew de elementos triangulares [33]

Para estos parámetros se fija un máximo de 6 para el Aspect Ratio y de 60 para el Skewness ya que para valores inferiores se considera que la malla es buena. Teniendo en cuenta esto, se obtienen algunos elementos que no cumplen con dichos parámetros, por lo tanto, se procede a arreglarlos de forma manual. En la Figura 43 se muestra un ejemplo del antes y después de varios elementos de no cumplen, estando a la izquierda en color blanco los elementos erróneos y a la derecha la nueva malla arreglada.

Tras realizar los ajustes correspondientes se obtiene una malla con un Aspect Ratio de 3.45 y un Skewness de 59.17, por lo cual esta malla se da por buena.

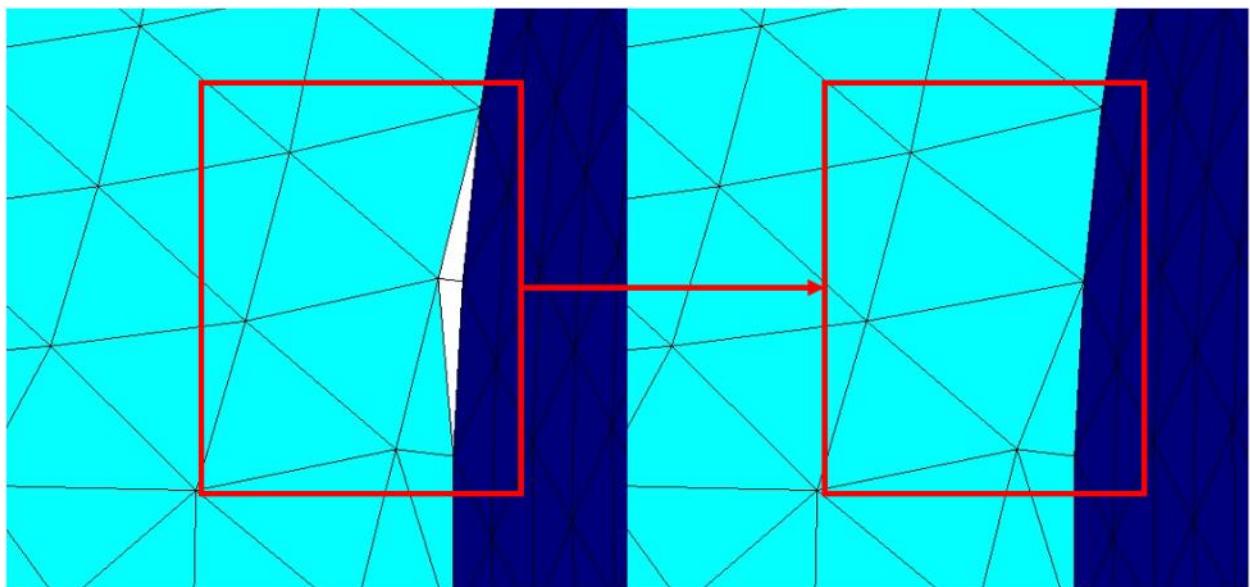


Figura 43: Arreglo manual de elementos problemáticos

6.2.3 Mallado tridimensional en ANSYS Fluent Meshing

En Fluent Meshing se trabaja directamente con la malla bidimensional, y gracias a la compatibilidad de este con Hypermesh, los grupos de superficies que se crean anteriormente son detectados automáticamente, facilitando esto el trabajo.

Primero se crean los dominios correspondientes (Figura 44), en este caso, casco, posicionadores, imanes y soporte. Con esto creado se utiliza la herramienta “Automesh”, en la cual se deja todo por defecto, únicamente definiendo el dominio como sólido y aplicando una ratio de crecimiento de malla de 1.2.

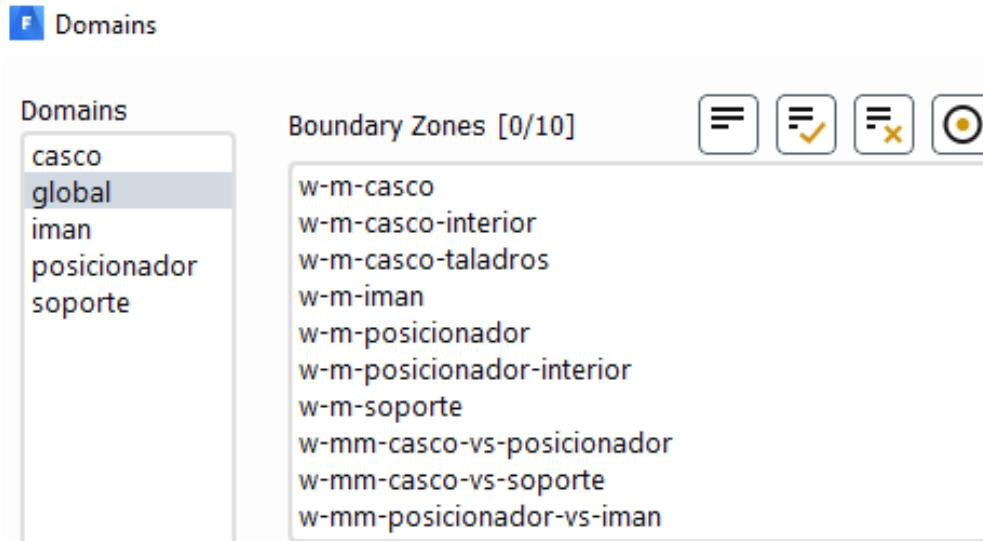


Figura 44: Dominios de malla

Para los dominios de los posicionadores y de los imanes Fluent crea varias regiones sólidas, separando los grupos de superficies creados anteriormente. Para que quede de una manera más clara y ordenada se reagrupan todos, siendo los grupos los mostrados en la Figura 45.

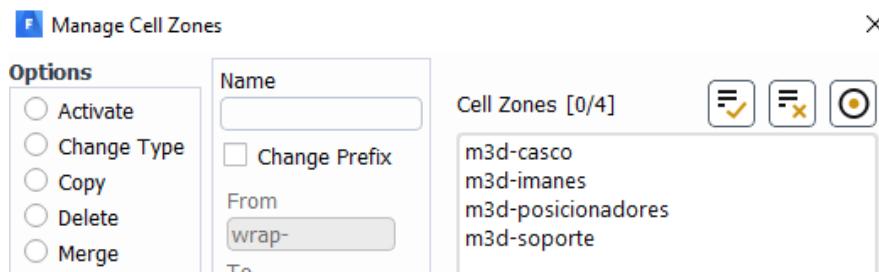


Figura 45: Regiones sólidas

Las mallas volumétricas se muestran en las imágenes comprendidas entre la Figura 46 y la Figura 49.



Figura 46: Malla volumétrica casco



Figura 47: Malla volumétrica soporte



Figura 48: Malla volumétrica posicionadores

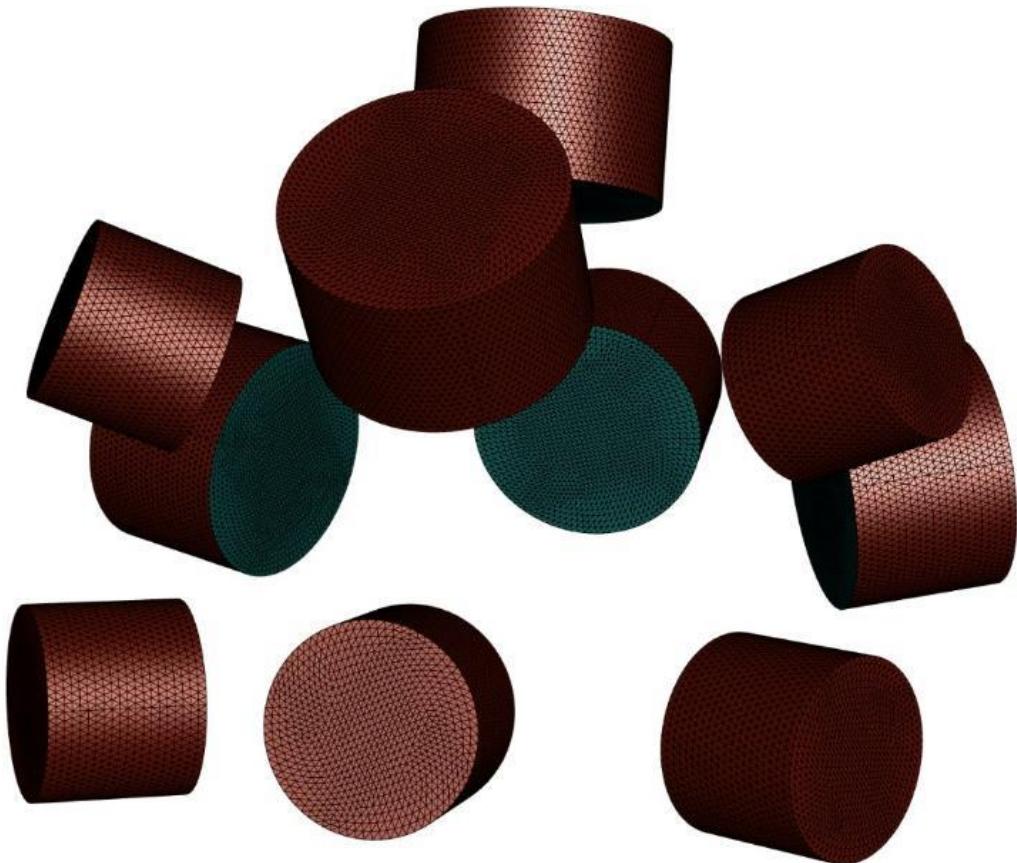


Figura 49: Malla volumétrica imanes

6.3 Análisis magneto-estático

Para este análisis se utiliza el módulo de ANSYS magneto-static, siguiendo el esquema de la Figura 50, realizándose para las dos posiciones de los imanes.

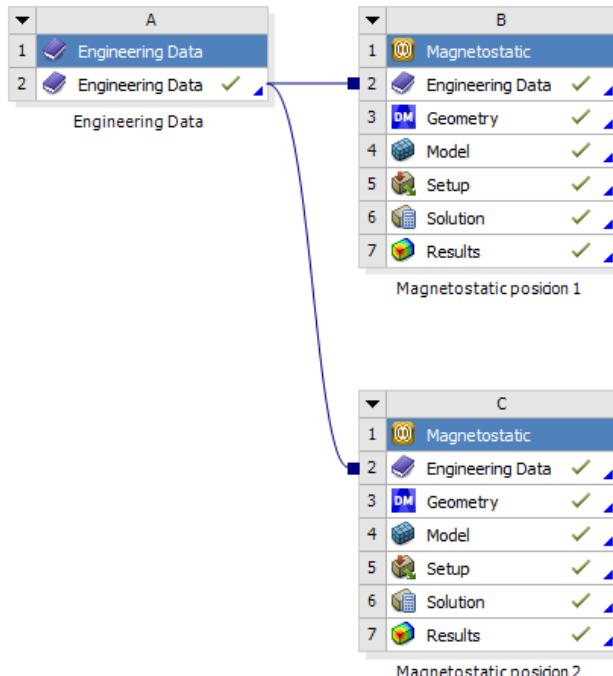


Figura 50: ANSYS Workbench magneto-static

Como se menciona anteriormente, no se pueden importar mallas de Fluent a este módulo, ya que, debido a problemas de compatibilidad de ANSYS, los análisis realizados arrojaban errores y no se podían realizar cálculos. Como en este caso se cuenta con una licencia completa de ANSYS no hay limitaciones de elementos de malla como si se encuentra en la de estudiantes, por lo tanto, se opta por realizar una malla automática con el mallado propio del módulo, pero configurándola de manera que se asemeje a la realizada en el punto 6.1.3.

Este análisis se realiza con dos funciones principales. La primera es obtener los valores numéricos de las fuerzas magnéticas generadas por los imanes seleccionados, mientras que la segunda es la de obtener las fuerzas generadas por los propios imanes, ya que es necesario conocer el valor de las mismas para el posterior análisis estático.

La configuración es idéntica para los estudios correspondientes a las dos posiciones de los imanes, por lo tanto, solo se hará distinción entre ambas partes para los resultados obtenidos.

6.3.1 Configuración de ANSYS Workbench

6.3.1.1 Engineering Data

El proceso inicial para la configuración del modelo consiste en la creación y ajuste del "Engineering Data", que conforma la base de datos de los materiales empleados en las simulaciones. Esta base permite la utilización de materiales ya predefinidos en la base de datos de ANSYS, así como la posibilidad de crear nuevos materiales por parte del usuario.

Este análisis se limita a la simulación de los imanes de neodimio, lo que implica la necesidad de establecer todas sus propiedades, ya que no se hallan previamente definidas en la base de datos de ANSYS. Los parámetros esenciales para este análisis abarcan la fuerza coercitiva, la inducción residual y la densidad. Los dos primeros datos se encuentran en la Tabla 16, siendo los correspondientes a N45 y N52. Por otro lado, la densidad se determina empleando los datos suministrados por el fabricante, aunque a pesar de estar compuestos por el mismo material, la densidad varía entre los dos tamaños seleccionados debido al revestimiento niquelado.

El material seleccionado para el recinto es el aire, el cual ya está predefinido en los materiales de ANSYS, por lo cual se selecciona sin mayores cambios.

Tabla 5: Propiedades Neodimio-N45

Properties	Value	Unit
Density	7512.1	kg/m ³
Coercive Force	11600	Oe
Residual Induction	1.38	T

Tabla 6: Propiedades Neodimio-N52

Properties	Value	Unit
Density	7587.5	kg/m ³
Coercive Force	10000	Oe
Residual Induction	1.48	T

Tabla 7: Propiedades Aire

Properties	Value	Unit
Density	1.225	kg/m ³
Isotropic Thermal Conductivity	0.0242	W/m * K
Specific Heat Constant Pressure	1006.4	J/kg * K
Isotropic Relative Permeability	1	-
Speed of Sound	346.25	m/s
Viscosity	$1.7894 * 10^{-5}$	kg/m * s
Lennard Jones Length	3.711	m
Lennard Jones Energy	78.6	J
Thermal Accom Coefficient	0.9137	-
Formation Entropy	$1.9434 * 10^{-5}$	J/K
Reference Temperature	298.15	K
Critical Pressure	$3.758 * 10^{-6}$	Pa
Critical Temperature	132.3	K
Acentric Factor	0.033	-
Critical Volume	0.002857	m ³
Molecular Weight	28.996	kg/kmol
Velocity Accom Coefficient	0.9137	m/s

6.3.1.2 Geometría en Design Modeler

Para este estudio solamente se necesitan los imanes como se menciona anteriormente, por lo tanto, se exporta la geometría directamente desde SolidWorks y se abre en Design Modeler.

Se utiliza este programa por dos razones principalmente:

- Para llevar a cabo este análisis, es necesaria la creación de un recinto de aire que contenga en su interior a todos los imanes, lo que permite el estudio de la propagación de las corrientes magnéticas alrededor de estos. El uso de este programa se debe a que posee una herramienta denominada “enclosure”, la cual permite la creación de este recinto de manera directa, permitiendo a su vez la configuración de las dimensiones de este como se puede ver en la Figura 51.

Details View	
Details of Enclosure2	
Enclosure	Enclosure2
Shape	Box
Number of Planes	0
Cushion	Uniform
<input type="checkbox"/> FD1, Cushion (>0)	200 mm
Target Bodies	All Bodies
Export Enclosure	Yes

Figura 51: Configuración recinto cerrado

- La segunda es que para evitar posibles errores en el posterior análisis se necesitan agrupar los cuerpos por separado en una sola parte, ya que de esta manera el programa detecta automáticamente que se trata de una geometría compartida, quedando como en la Figura 52.

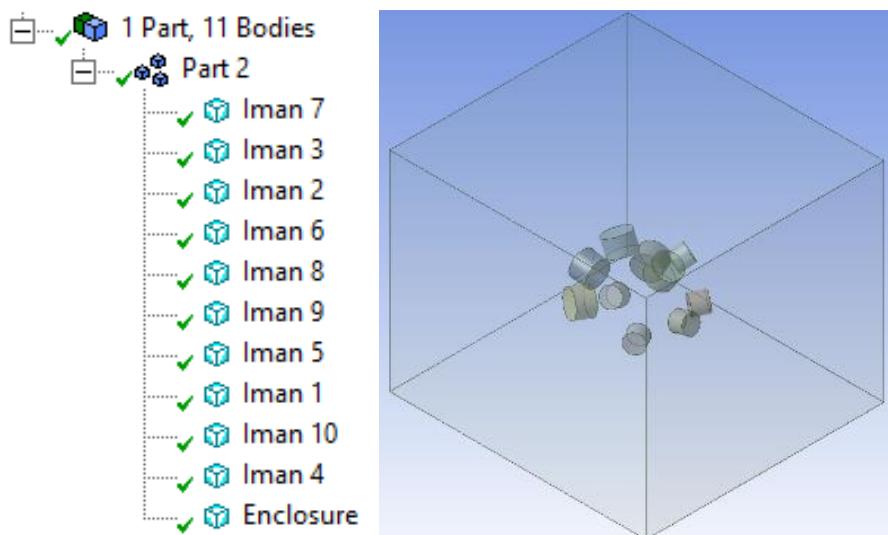


Figura 52: Partes y distribución en Design Modeler

6.3.1.3 Configuración del análisis magneto-estático

El primer paso para la configuración consiste en asignar un material a cada cuerpo. Los imanes se identifican con la numeración visible en la Figura 53, mientras que la asignación de materiales a cada cuerpo se muestra en la Tabla 8.

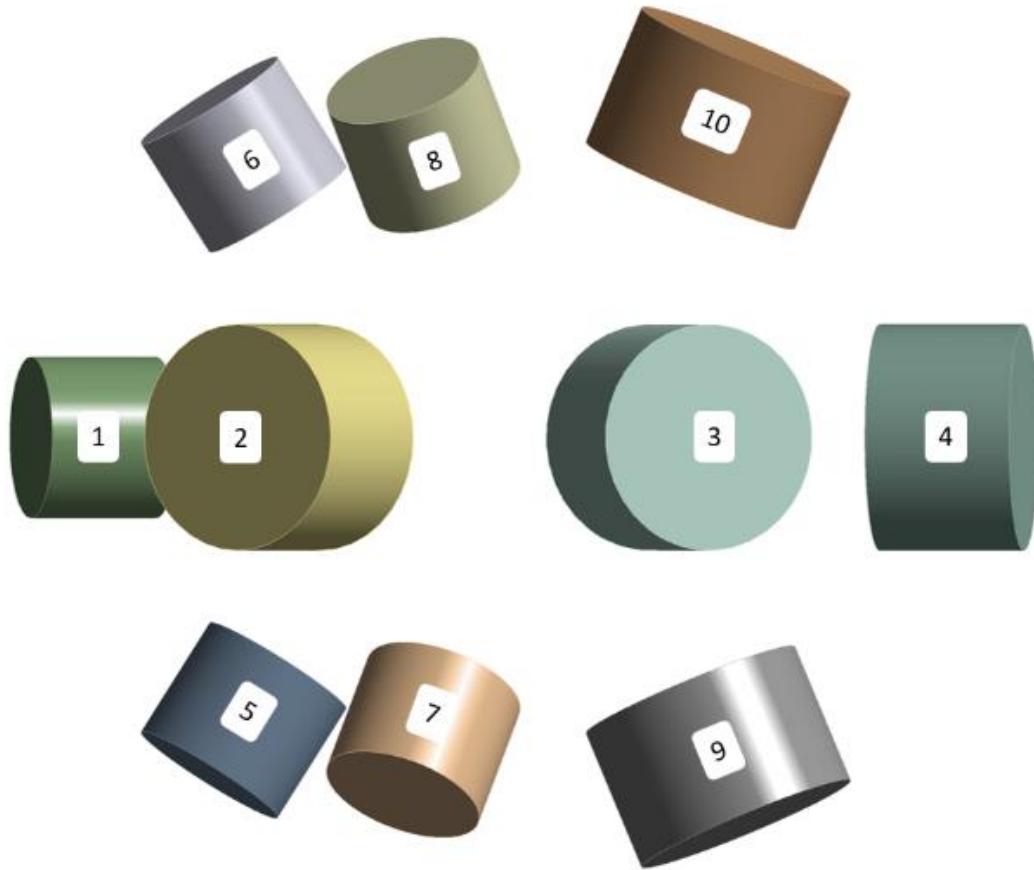


Figura 53: Asignación numérica de imanes

Tabla 8: Asignación de materiales magneto-estático

Body	Material
Iman 1	Neodimio-N45
Iman 2	Neodimio-N52
Iman 3	Neodimio-N52
Iman 4	Neodimio-N52
Iman 5	Neodimio-N45
Iman 6	Neodimio-N45
Iman 7	Neodimio-N45
Iman 8	Neodimio-N45
Iman 9	Neodimio-N52
Iman 10	Neodimio-N52
Enclosure	Aire

El segundo paso implica la configuración de la polaridad de los imanes. Para esto, se establecen diferentes sistemas de coordenadas, todos posicionados en la superficie exterior de los imanes, con el eje x extendiéndose hacia el exterior, tal como se ilustra en la Figura 54 (no se muestran todos los ejes de coordenadas para que la imagen sea más clara y entendible).

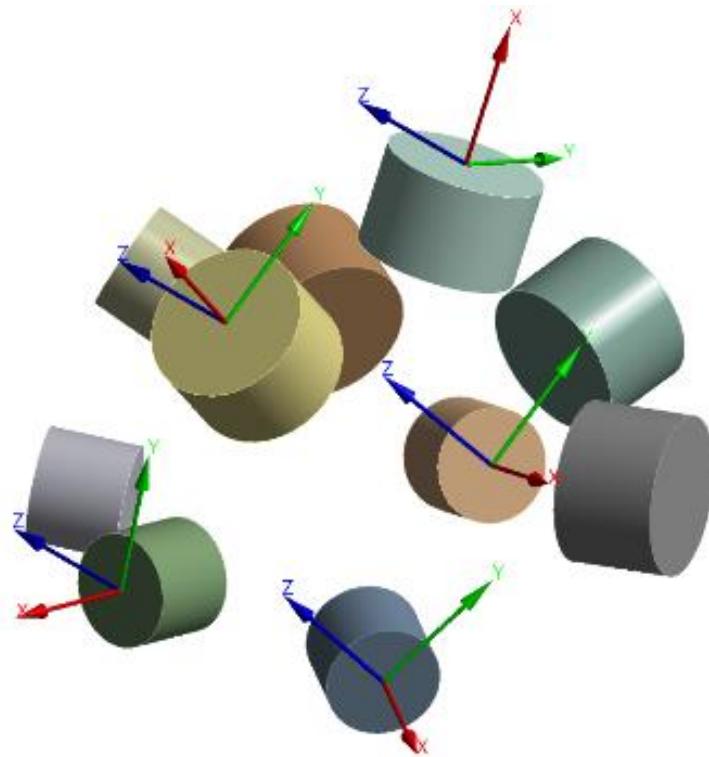


Figura 54: Sentido eje de coordenadas y de polarización de los imanes

Cabe destacar que ANSYS asigna automáticamente la dirección de polarización del imán al eje de coordenadas x. Por tanto, resulta fundamental que todos los imanes dispongan de sus polos dispuestos en las direcciones adecuadas para garantizar un análisis preciso.

El tercer paso consiste en la configuración del mallado, ya que como se menciona anteriormente, para este tipo de análisis no se puede trabajar con mallas importadas creadas con la metodología del apartado 6.1.3.

Para crear una malla lo más similar posible, se imponen dos condiciones al configurador de malla de ANSYS:

- Mediante la herramienta "fase sizing", se eligen las superficies asociadas a los imanes, con la restricción de que los elementos deben tener un tamaño de 2 mm, igualando así las dimensiones de los elementos en las mallas generadas en el apartado 6.1.3.

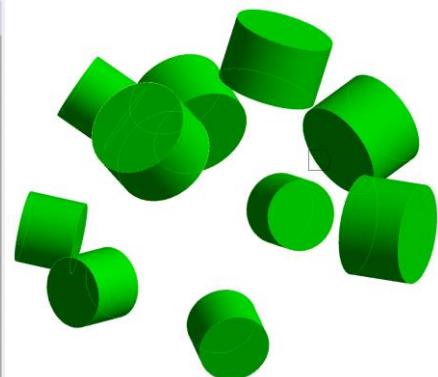
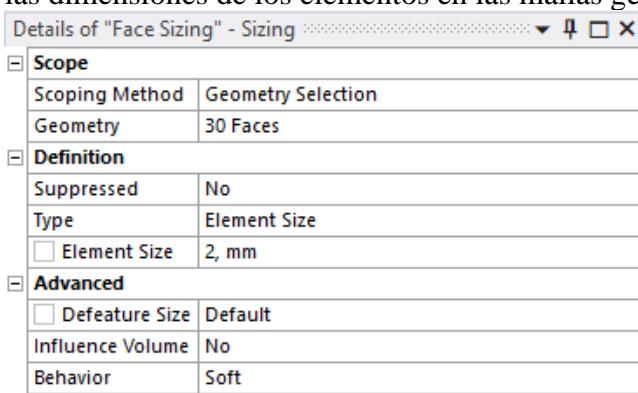


Figura 55: Configuración “fase sizing”

- En ANSYS, los elementos por defecto que se generan son hexaedros. No obstante, mediante el uso de la herramienta "patch conforming method" y seleccionando los volúmenes relevantes relacionados con los imanes, es posible cambiar la tipología de mallado para utilizar tetraedros. Esta adaptación alinea la metodología de mallado con el enfoque empleado en la sección 6.1.3.

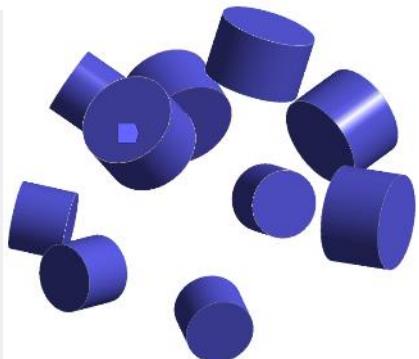
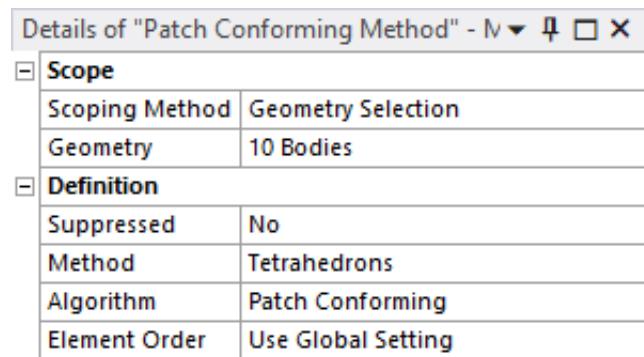


Figura 56: Configuración “patch conforming method”

Con estas consideraciones la malla para los imanes se puede apreciar en la Figura 57 mientras que la malla de la cubierta de aire se muestra en la:

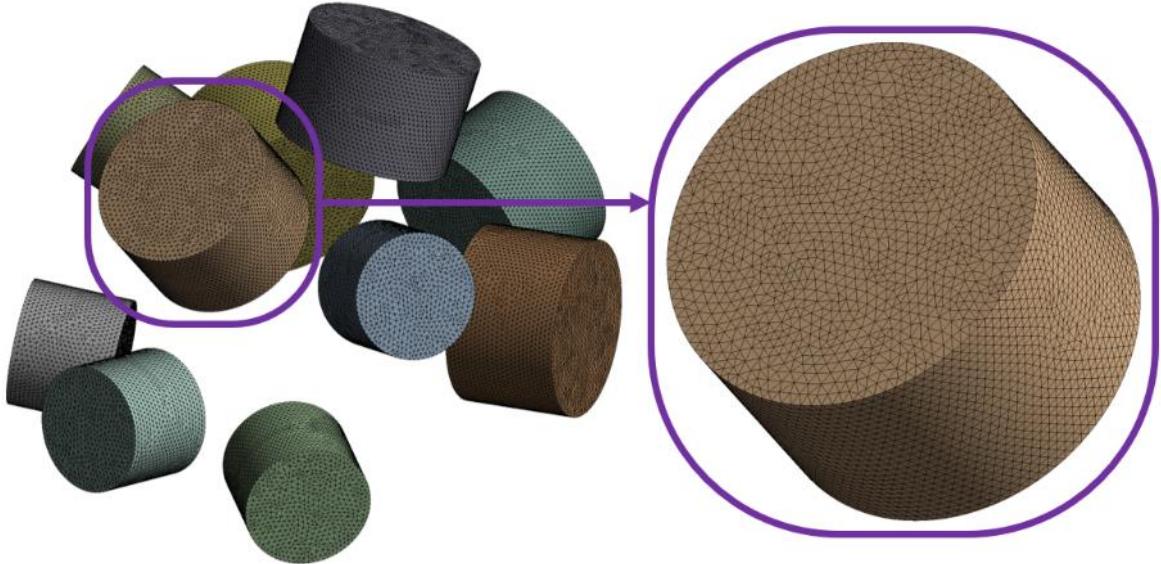


Figura 57: Malla imanes

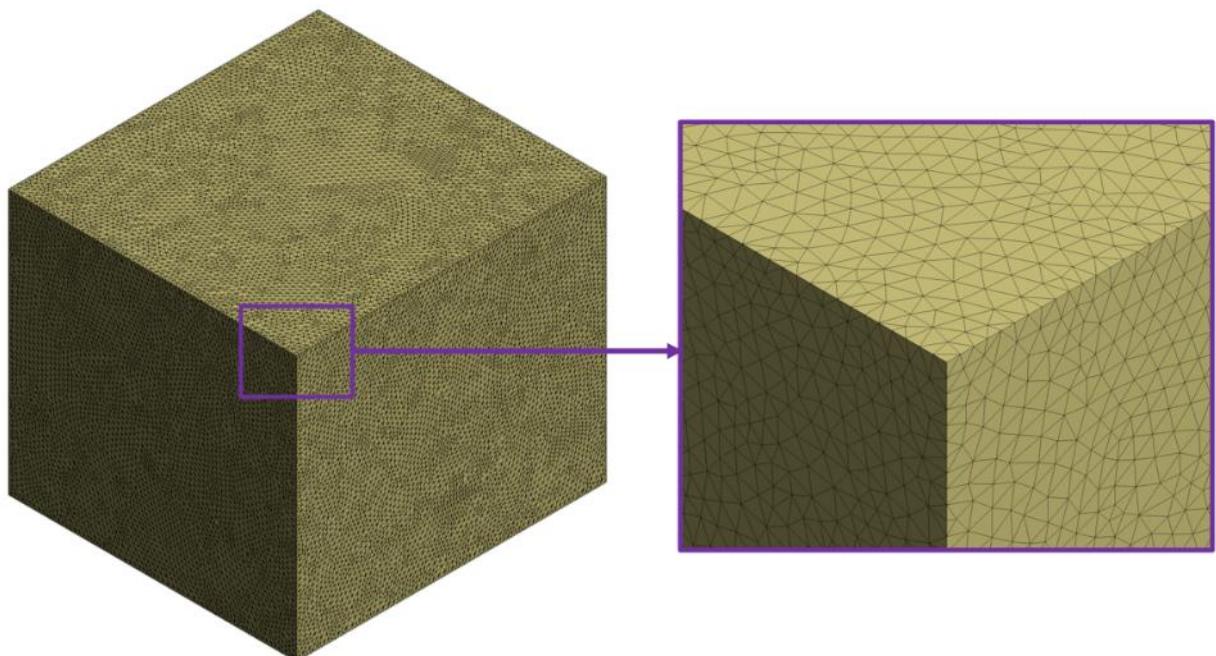


Figura 58: Malla cubierta de aire

Por último, para el correcto funcionamiento del análisis se necesita definir el “magnetic flux parallel”. Esta herramienta se utiliza para definir el alcance del estudio, limitándolo a las superficies que encierran el volumen de la cubierta de aire, permitiendo evaluar y visualizar la distribución y comportamiento del flujo en su interior.

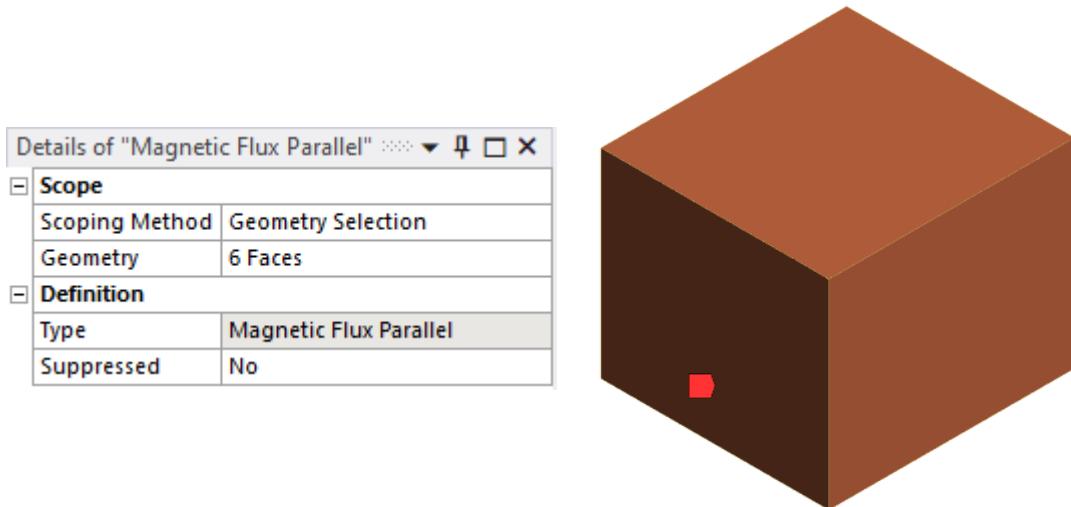


Figura 59: Configuración “Magnetic flux parallel”

6.3.2 Resultados del análisis

Como se menciona anteriormente, los resultados obtenidos para este análisis son la densidad total de flujo magnético, la intensidad total del campo magnético y la fuerza total ejercida por estos campos. Los dos primeros se utilizan a modo de comprobación, mientras que la fuerza total se exporta como input para el análisis estructural como se explica en el apartado 6.4.1.3.

6.3.2.1 Resultados posición 1

En esta primera posición los resultados arrojan una leve interacción entre los imanes, tanto para el flujo magnético como para la intensidad de campo mostrándose los resultados obtenidos en la Figura 60 y Figura 62. En la Figura 61 y la Figura 63 se muestran estos mismos resultados, pero con un plano de corte en el perfil de los imanes.

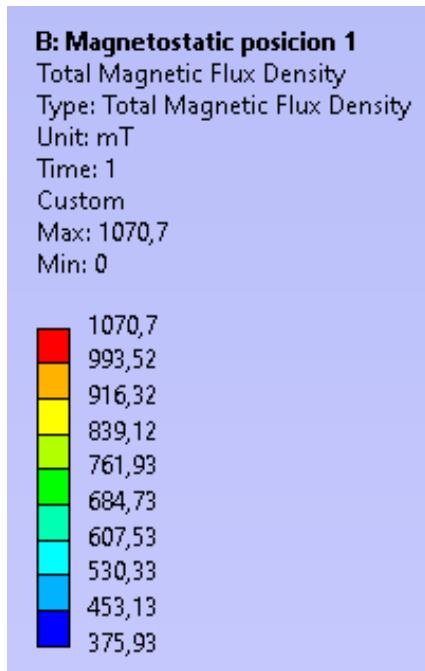


Figura 60: Densidad total de flujo magnético posición 1

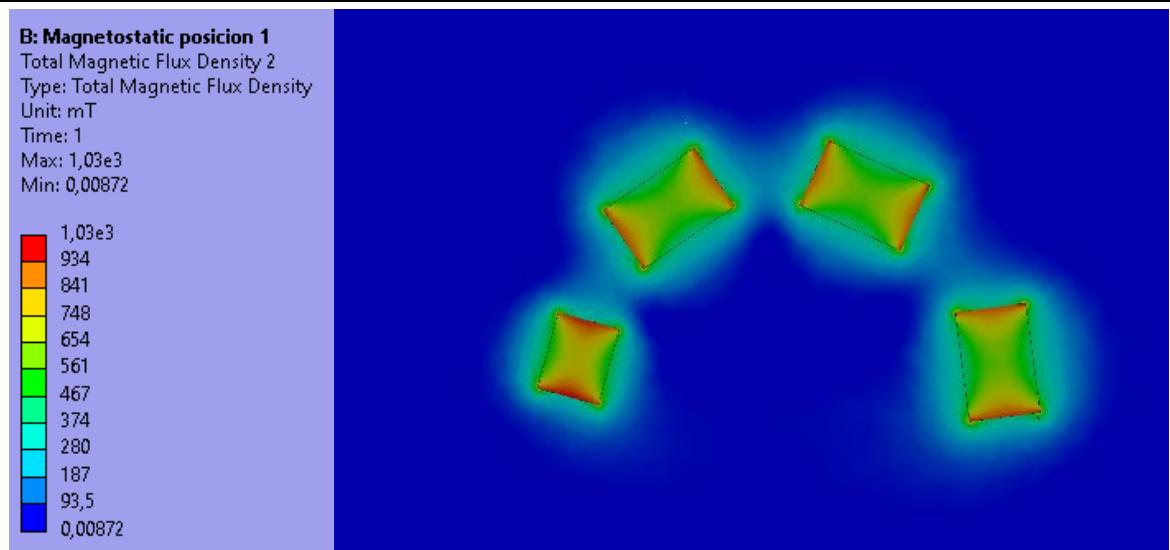


Figura 61: Densidad total de flujo magnético en plano de corte posición 1

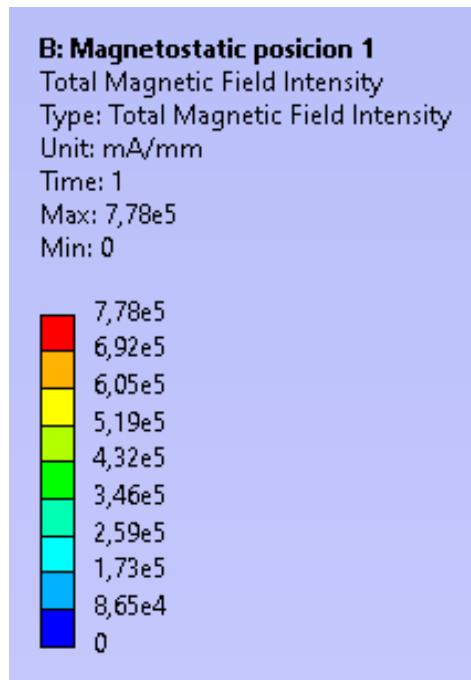


Figura 62: Intensidad total de campo magnético posición 1

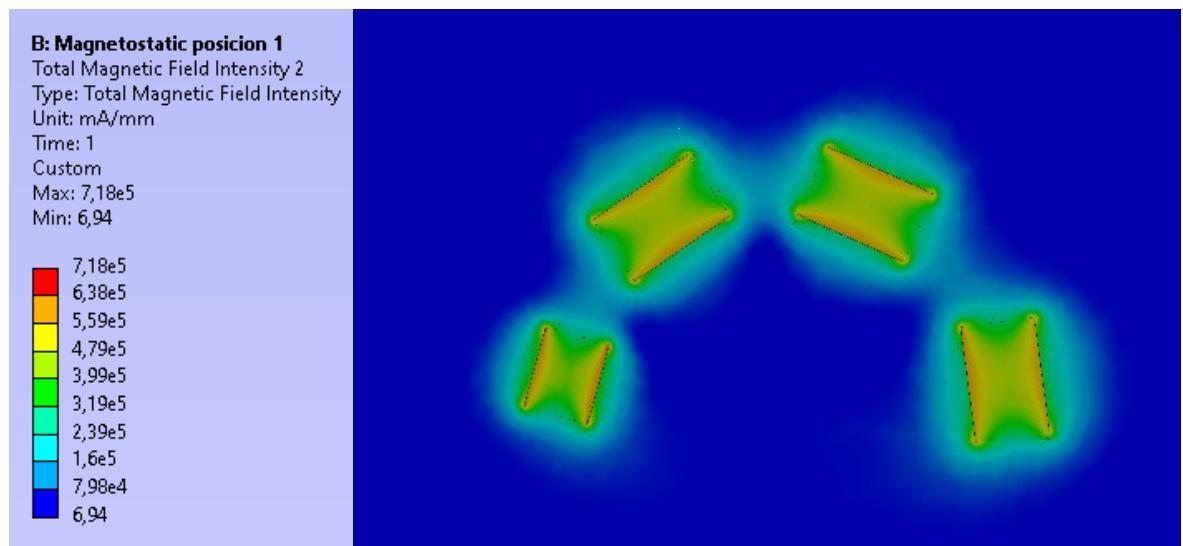


Figura 63: Intensidad total de campo magnético en plano de corte posición 1

En cuanto a las fuerzas generadas por la atracción de estos imanes son menores a 10 N, lo cual es indicativo de la mínima interacción entre campos arrojada en los resultados anteriores y que cumple con el propósito que se busca de que apenas hay esfuerzos para esta configuración.

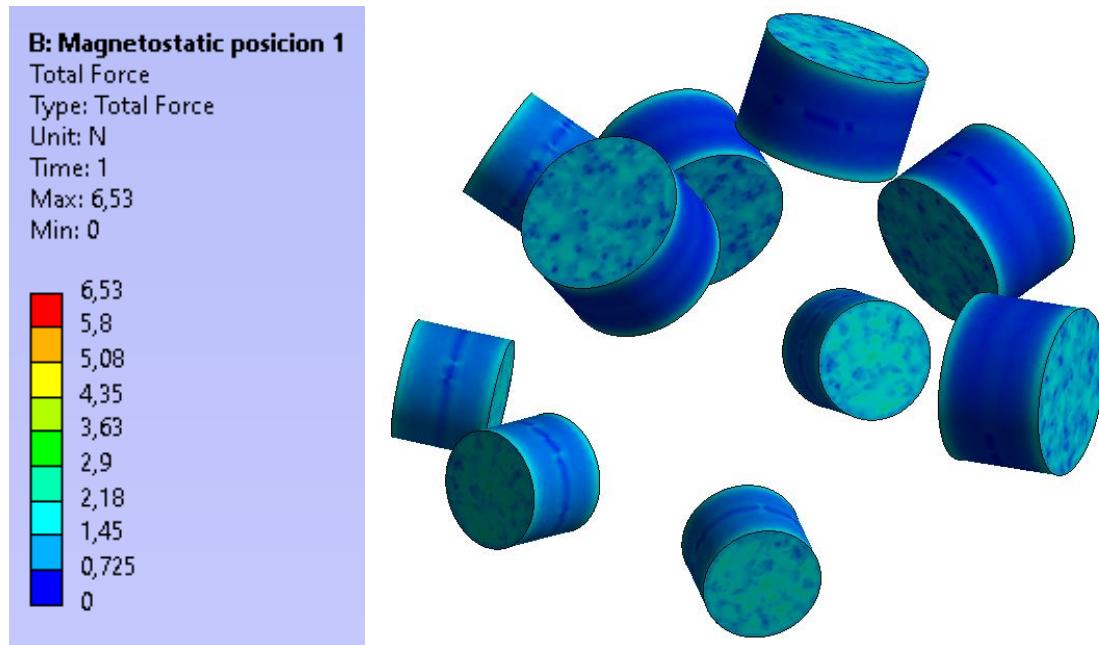


Figura 64: Fuerzas totales en las superficies de los imanes posición 1

6.3.2.2 Resultados posición 2

Para esta segunda posición, se produce un incremento notablemente visible en comparación con los anteriores, reflejándose en ambos estudios, siendo más notable en los análisis que incluyen los planos de corte. Al igual que para el caso previo, los resultados obtenidos se muestran comprendidos entre la Figura 65 y la Figura 68, siguiendo el mismo esquema que anteriormente.

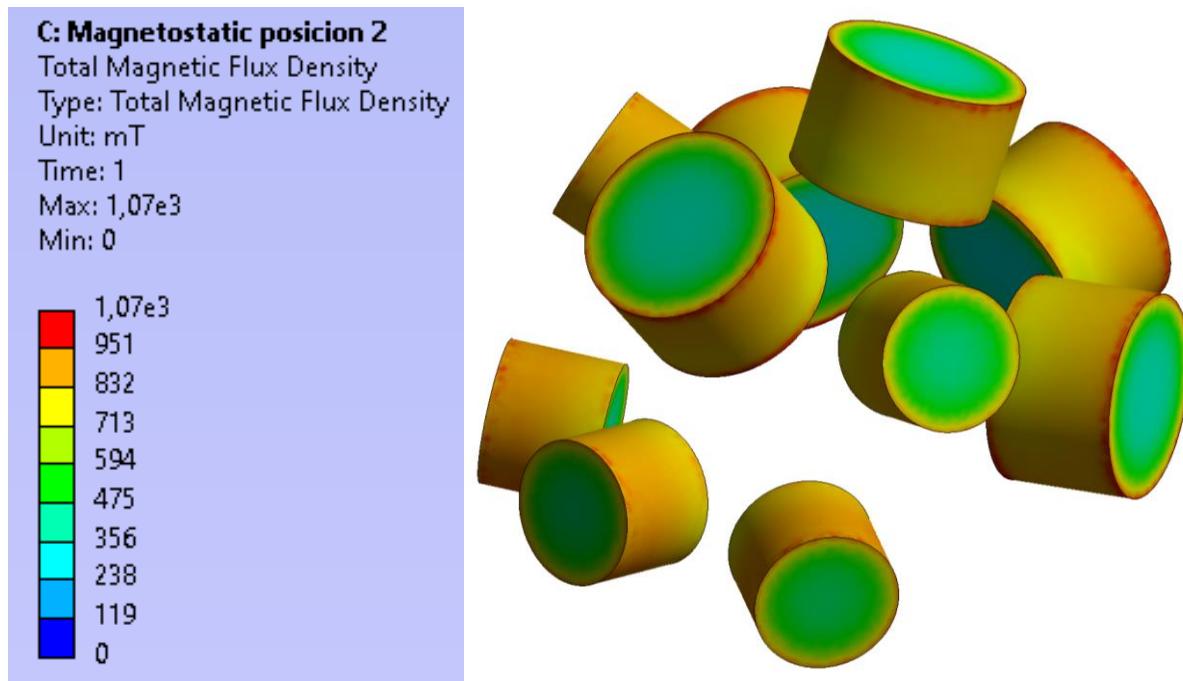


Figura 65: Densidad total de flujo magnético posición 2

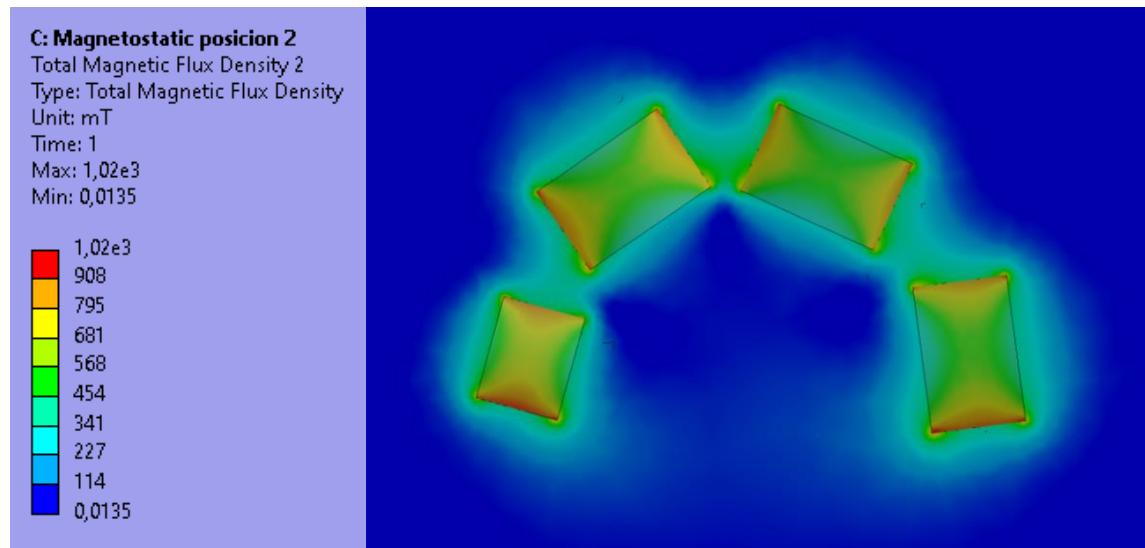


Figura 66: Densidad total de flujo magnético en plano de corte posición 2

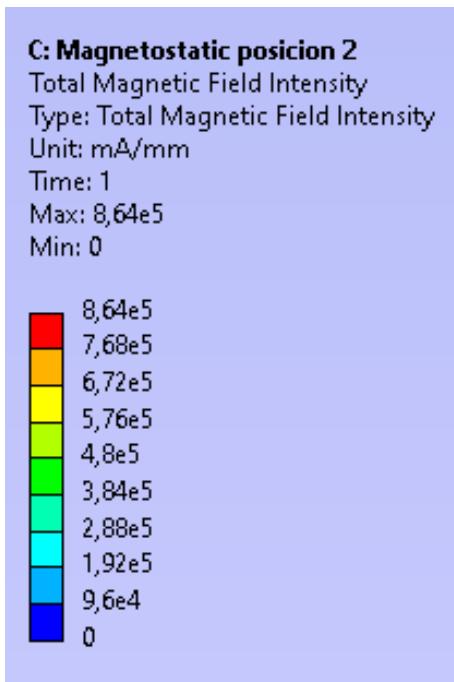


Figura 67: Intensidad total de campo magnético posición 2

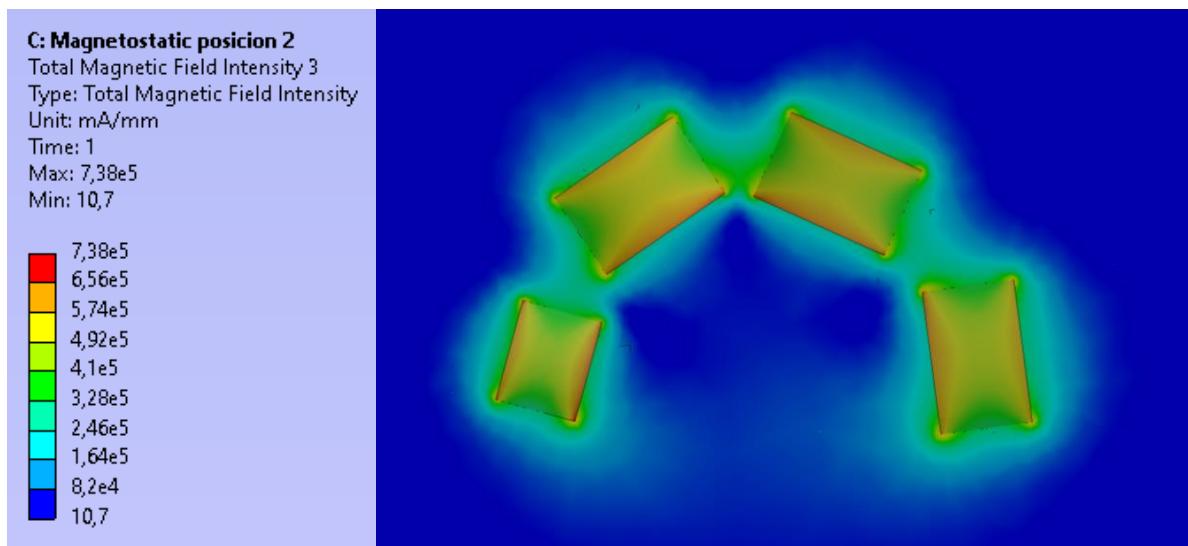


Figura 68: Intensidad total de campo magnético en plano de corte posición 2

En este segundo caso, a pesar del incremento de la interacción producida entre los imanes, apenas se ve reflejado en las fuerzas de atracción producidas entre estos.

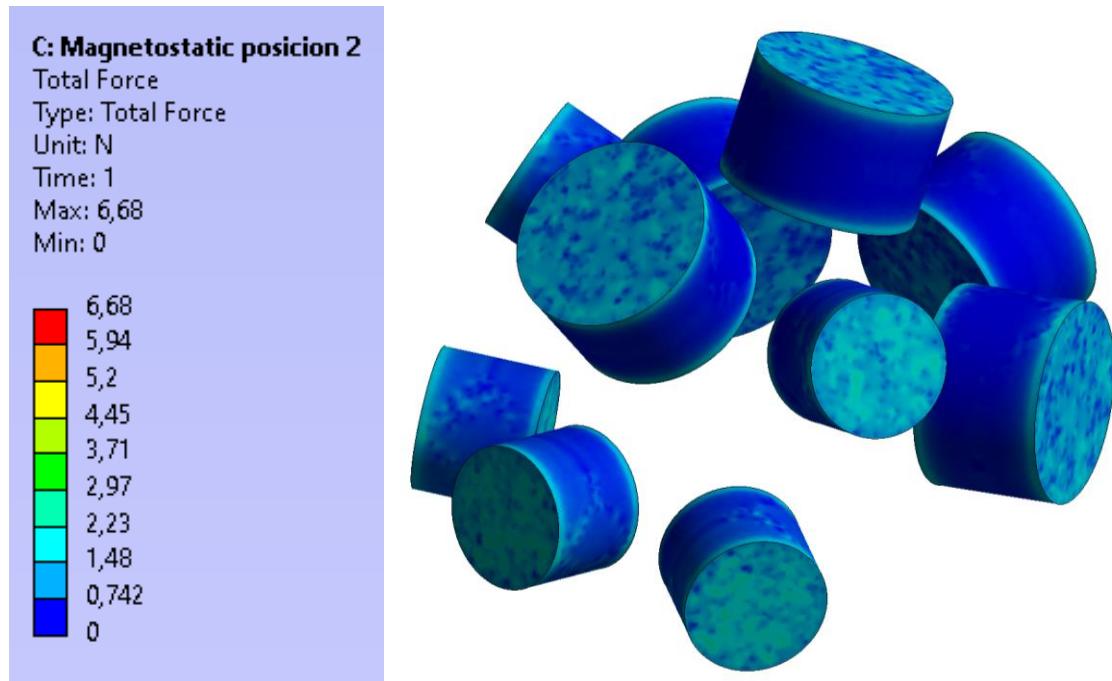


Figura 69: Fuerzas totales en las superficies de los imanes posición 2

6.4 Análisis estático-estructural

Para este análisis se utiliza el módulo de ANSYS static-structural, siguiendo el esquema de la Figura 70, realizándose para las dos posiciones de los imanes.



Figura 70: ANSYS Workbench static-structural

Para este análisis ya es posible trabajar con las mallas creadas en el apartado 6.1.3.

Se realiza para las dos posiciones de los imanes, con el fin de justificar que el diseño es válido, y soporta a la perfección las fuerzas a las que se encuentra sometido, además de un estudio adicional para el soporte, con la misma finalidad que los anteriores. Este no se estudia de manera combinada, ya que, las fuerzas de mayor dimensión se producen en el soporte, no siendo apreciables las producidas en el resto de los componentes.

En este caso, la configuración continúa siendo similar para los casos relacionados con los imanes, diferenciándose únicamente en la importación de los resultados obtenidos para las fuerzas en el análisis magneto-estático. Por lo tanto, se realiza una explicación en conjunto para ambos, ya que, para la importación de resultados, simplemente varía la ruta de los resultados.

6.4.1 Configuración de ANSYS Workbench

6.4.1.1 Engineering Data

De igual manera que en el proceso anterior, es necesario configurar el "Engineering Data" para contar con las propiedades de todos los materiales involucrados en esta simulación.

Para este caso se emplean el aluminio 7075 y la poliamida 12, los cuales es necesario configurar, ya que, desafortunadamente no se encuentran en la base de datos de ANSYS. Los valores empleados para estos componentes se encuentran en la Tabla 10 y la Tabla 11 respectivamente.

También es necesario complementar los datos utilizados para los imanes en la tabla anterior, añadiendo sus propiedades mecánicas. Como en este caso el material base es el neodimio, sus propiedades mecánicas son comunes para ambos tamaños de imán, por lo que dichos valores se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9: Propiedades mecánicas Neodimio [34]

Physical properties	Value	Units
Tensile yield strength	170	MPa
Tensile ultimate strength	165	MPa
Modulus of elasticity	41.4	GPa
Poisson's ratio	0.281	

Tabla 10: Propiedades mecánicas del aluminio 7075 [35] [36]

Properties	Value	Units
Density	2810	kg/m ³
Tensile Ultimate Strength	572	MPa
Tensile Yield Strength	503	MPa
Shear Resistance	331	MPa
Fatigue Resistance	159	MPa
Young's Modulus	71.7	GPa
Poisson's Ratio	0.33	
Specific Heat Constant Pressure	0.96	J/g * K

Tabla 11: Propiedades PA12 smooth [37] [38]

Properties	Value	Units
Density	920	kg/m ³
Tensile Ultimate Strength	41	MPa

Tensile Yield Strength	32	MPa
Young's Modulus	1.470	GPa
Poisson's Ratio	0.35	
Specific Heat Constant Pressure	0.96	J/g * K

6.4.1.2 Importado de geometrías

En este caso, ANSYS cuenta con un módulo que permite importar mallas creadas en otros programas, denominado “External Model”.

Este cuenta con una configuración básica, en la que simplemente se necesita darle un input y configurar las unidades del mismo. En la Figura 71 y Figura 72 se muestran los inputs empleados en estas simulaciones. Cabe destacar, que, para evitar errores a la hora de trabajar con los modelos, es necesario que cada malla volumétrica se importe por separado, ya que, en caso de importar el modelo todo junto, el módulo estático-estructural detecta todas las mallas como un mismo cuerpo, fusionando los nodos y creando un solo sólido, a pesar de crear dominios separados en Fluent, siendo esto inservible a la hora de llevar a cabo la configuración. Por lo tanto, la metodología empleada, se considera la opción más viable y rápida.

Outline of Schematic C2 : External Model					
	A	B	C	D	
1	Data Source	Location	Identifier	Description	
2	D:\TFM\static\20230823-mallas\malla-pos-1-casco.msh	...	File1		
3	D:\TFM\static\20230823-mallas\malla-pos-1-imanes.msh	...	File2		
4	D:\TFM\static\20230823-mallas\malla-pos-1-posicionadores.msh	...	File3		
5	D:\TFM\static\20230823-mallas\malla-pos-1-soporte.msh	...	File4		
6	Click here to add a file	...			

Figura 71: Input posición 1

Outline of Schematic E2 : External Model					
	A	B	C	D	
1	Data Source	Location	Identifier	Description	
2	D:\TFM\static\20230825-mallas\malla-pos2-casco.msh	...	File1		
3	D:\TFM\static\20230825-mallas\malla-pos2-imanes.msh	...	File2		
4	D:\TFM\static\20230825-mallas\malla-pos2-posicionadores.msh	...	File3		
5	D:\TFM\static\20230825-mallas\malla-pos2-soporte.msh	...	File4		
6	Click here to add a file	...			

Figura 72: Input posición 2

Para la configuración de unidades, simplemente se deben modificar los valores por defecto de metro a milímetro, ya que estas geometrías están creadas en milímetros.

6.4.1.3 Configuración módulo estático-estructural

A pesar de haber cargado la malla del soporte, se excluye de estas simulaciones, debido al análisis individual mencionado anteriormente.

El primer paso al igual que en la simulación anterior, se le asigna el material correspondiente a cada componente. Para los imanes se adopta la asignación de materiales correspondiente a la Tabla 8, y para los nuevos componentes, se establecen los materiales creados en el apartado 6.4.1.1

mostrándose en la Tabla 12. En esta se muestra también el material empleado para el soporte, debido a que, en su respectivo análisis, es necesario asignarle un material.

Tabla 12: Asignación de materiales estático-estructural

Body	Material
Conjunto simplificado D50	PA 12
Conjunto simplificado D70	PA 12
Casco	Aluminio 7075
Soporte	Aluminio 7075

Para el segundo paso es necesario definir los contactos entre componentes, los cuales, se mantienen por defecto. Estos vienen prefijados como “bonded”, en otras palabras, las superficies en contacto no pueden separarse, es decir, no hay deslizamiento ni separación entre las partes, ya que a la hora de realizar las simplificaciones mencionadas en el apartado 6.1, se supone que todas las uniones son permanentes. En la Figura 73 se muestra el detalle de cómo son dichas uniones.

Bonded - Solid Body 1(External Model) To Solid Body 2(External Model)

- █ Bonded - Solid Body 1(External Model) To Solid Body 2(External Model) (Contact Bodies)
- █ Bonded - Solid Body 1(External Model) To Solid Body 2(External Model) (Target Bodies)

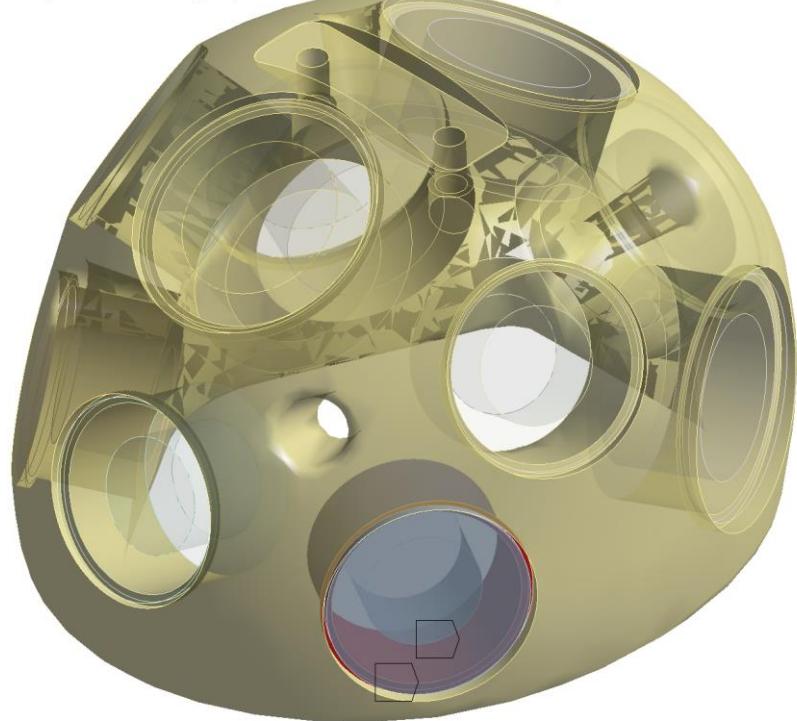


Figura 73: Detalle unión “bonded”

El tercer paso es añadir la fuerza de la gravedad. En este módulo ya viene incluida una opción por defecto que permite añadir esta opción, siendo necesario fijar el eje en el cual se aplica. Para este caso se aplica en el eje y componente negativa, como se puede observar en la Figura 74.

Details of "Standard Earth Gravity"	
Scope	All Bodies
Definition	
Coordinate System	Global Coordinate System
X Component	0, mm/s ² (ramped)
Y Component	-9806,6 mm/s ² (ramped)
Z Component	0, mm/s ² (ramped)
Suppressed	No
Direction	-Y Direction

Figura 74: Detalle configuración de la gravedad

El cuarto paso es configurar el “fixed support”. Esta opción permite indicar que superficies o componentes cuentan con una posición fija en el espacio, pudiendo limitar los ejes de manera independiente en caso de ser necesario. Para ambos estudios, ya sean los pertenecientes a los casos donde se incluyen los imanes, como, para el perteneciente al soporte, las fijaciones se van a dar en las superficies destinadas al alojamiento de los tornillos. Estas se muestran en los detalles de la Figura 75.

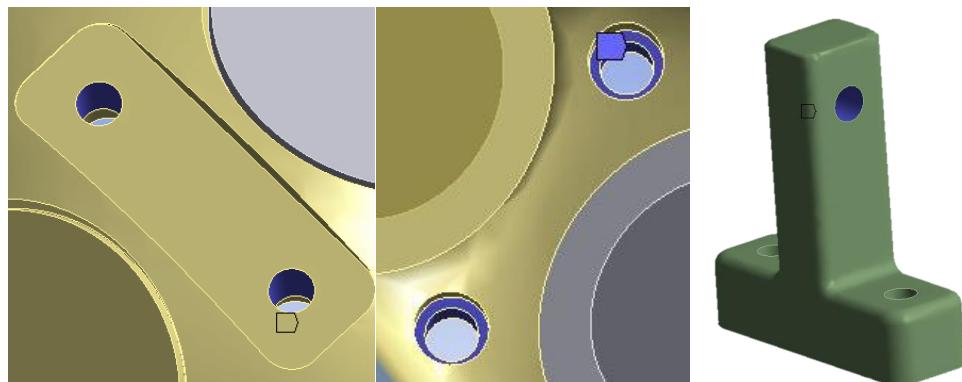


Figura 75: Detalle fixed support

Por último, se importan y configuran las fuerzas que afectan a cada caso. Para los modelos en los que afectan los imanes, se deben utilizar comandos avanzados, en concreto el lenguaje de programación interno de ANSYS, ANSYS APDL (Ansys Parametrical Design Language). La utilización de este lenguaje es necesaria, debido a la falta de inter compatibilidad para exportar los resultados de las fuerzas obtenidas en el análisis magneto-estático, hacia el análisis estático-estructural. Para insertar estos comandos ANSYS cuenta con una opción implementada directamente en el menú del análisis, siendo esta la de “Commands (APDL)”, insertándose en este el código mostrado a continuación:

/SOLU

**DO, I_LOAD*

LDREAD, FORCE, I_LOAD, LAST,, 'D:\TFM\Simulations\2_imanes_magno_files\dp0\SYS\MECH\file','rmg'

SOLVE

**ENDDO*

Este, permite extraer los resultados deseados del archivo generado en análisis magneto-estático. Este se puede encontrar accediendo al fichero creado por ANSYS, localizándose fácilmente por su extensión “.rmg” (results magnetic). De aquí solamente interesa extraer los resultados obtenidos para las fuerzas de ahí la palabra “Force”.

Para el análisis correspondiente al soporte se añade una fuerza en el eje “y” negativo equivalente al peso del casco, los conjuntos de posicionadores y los imanes, obteniendo un valor

total de 26.13 kg o 253.25 N. Esta se aplica en la superficie correspondiente a la cara inferior del mismo, lo que, es decir, a la cara que se encuentra en contacto con el casco.

6.4.2 Resultados simulación

Para realizar una correcta verificación en los diferentes análisis realizados, se comprueban los parámetros correspondientes a la Tensión de Von Mises y la Deformación Total, añadiendo un estudio para el coeficiente de seguridad.

6.4.2.1 Resultados posición 1

En las figuras a continuación se muestran los esfuerzos soportados por el modelo cuando los imanes se encuentran situados en la primera posición.

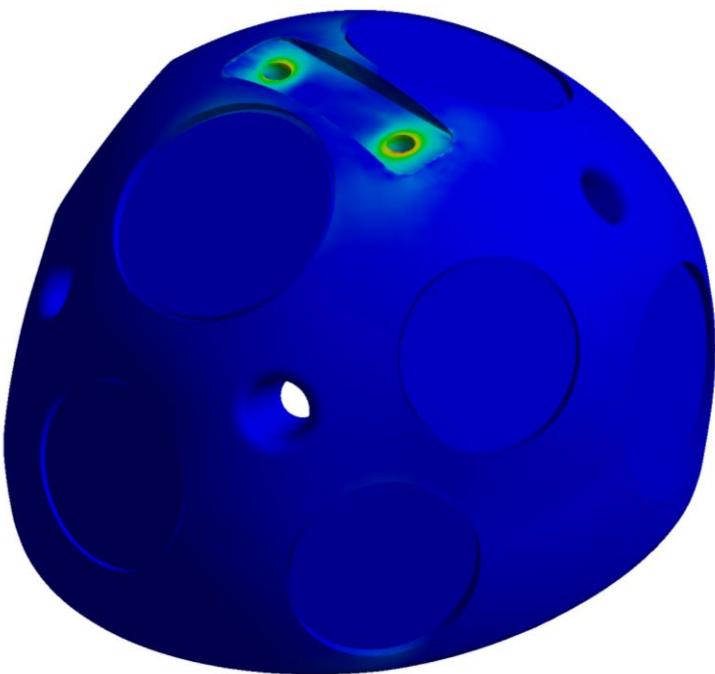
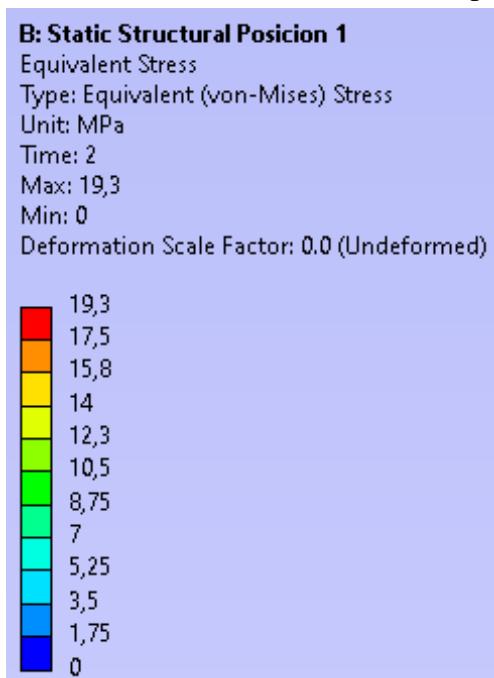


Figura 76: Tensión de Von Mises posición 1

En el caso de la tensión de Von Mises, el valor pico es de 19.3 MPa en el casco, acumulándose esta tensión en la zona donde se posicionan los tornillos de sujeción, como se puede apreciar con mayor detalle en la Figura 77. Para los posicionadores es de 0.31 MPa, por lo que prácticamente se considera despreciable.

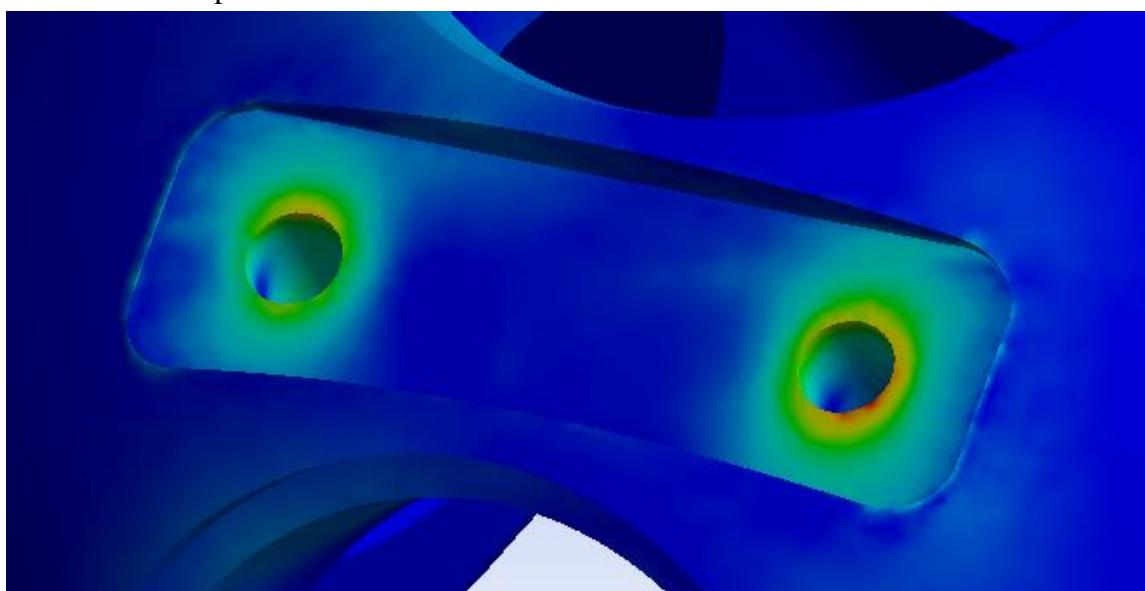


Figura 77: Detalle de pico de tensión en casco

Contando con estos valores, se realiza un análisis complementario que arroja el factor de seguridad que tiene la estructura, estando este limitado a un valor máximo de 15 por ANSYS. Para este análisis se muestra un factor de seguridad máximo en todos los componentes, debido a los elevados límites elásticos de los materiales en relación a las bajas cargas que deben soportar.

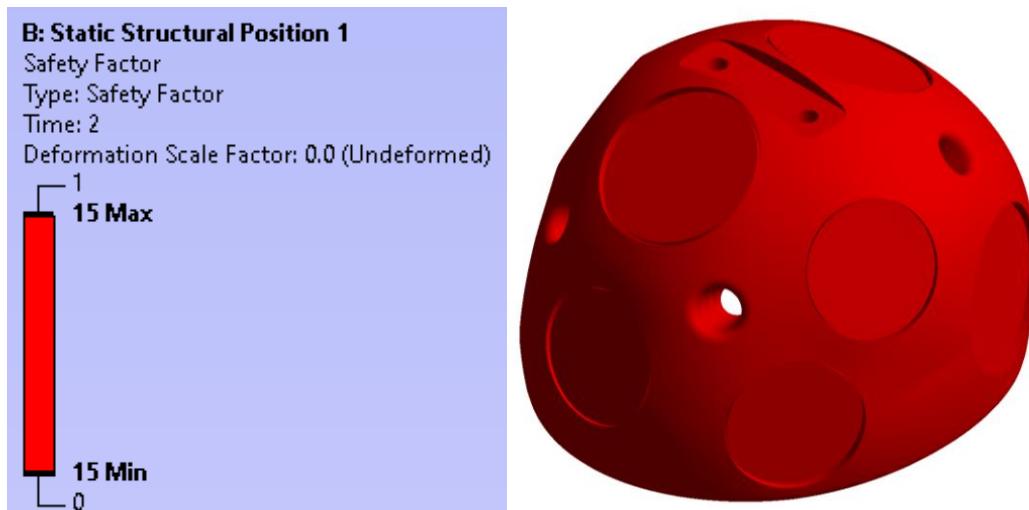


Figura 78: Factor de seguridad posición 1

Para la deformación total, se obtienen los valores máximos en la zona inferior, la cual es la más alejada de los fixed supports. Esto es debido al peso de la estructura y la fuerza de la gravedad, ya que las fuerzas de los imanes no tienen un gran impacto en este.

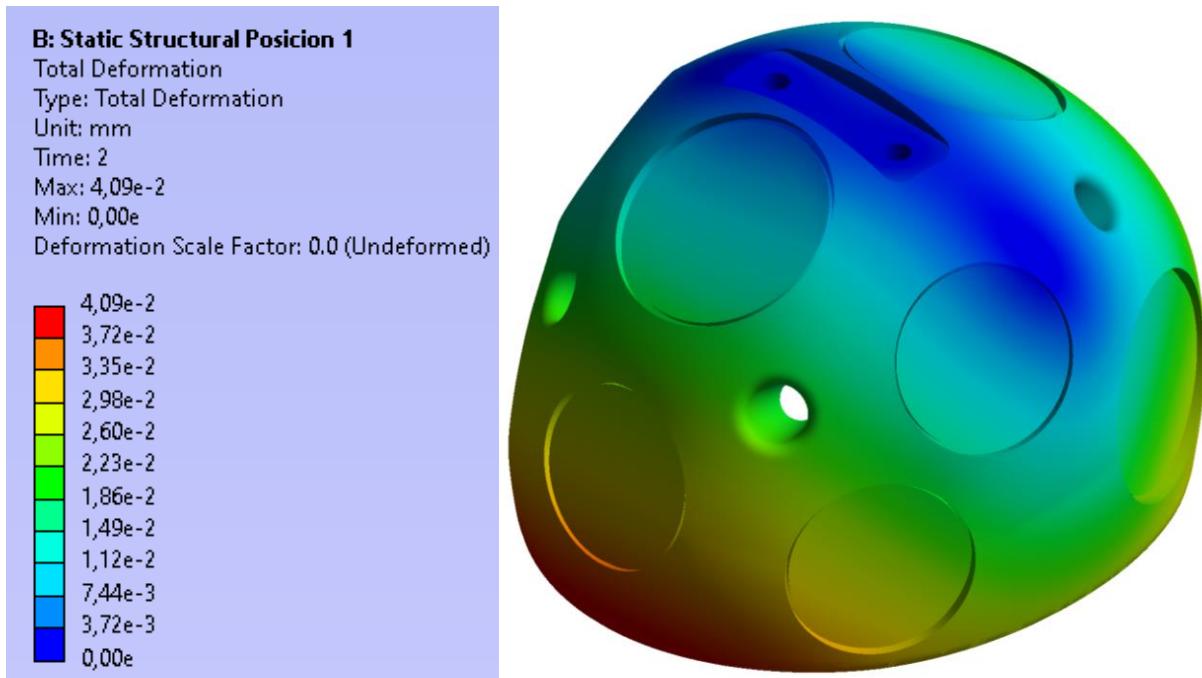


Figura 79: Deformación total posición 1

6.4.2.2 Resultados posición 2

Para este segundo caso, los resultados obtenidos son prácticamente iguales que en el descrito anteriormente, con una pequeña disminución de los valores obtenidos. Esto es debido a que, al encontrarse los imanes en la posición de máxima extensión, se encuentran más próximos al centro de gravedad de la estructura, lo que, debido a su peso, hace que se reduzcan las fuerzas iniciales generadas por ellos, justificando así esta disminución en los valores obtenidos.

En el caso del factor de seguridad, se incrementaría este, pero con la limitación mencionada anteriormente, el resultado obtenido es el mismo que para la Figura 78.

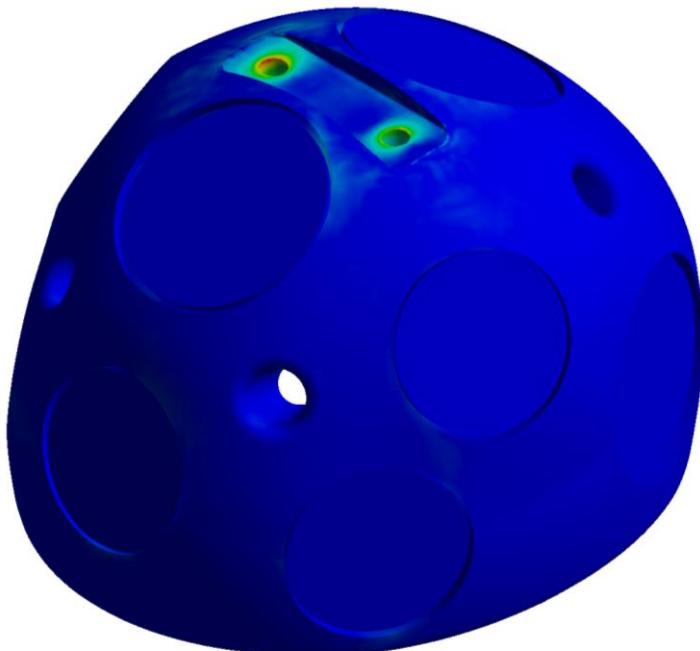
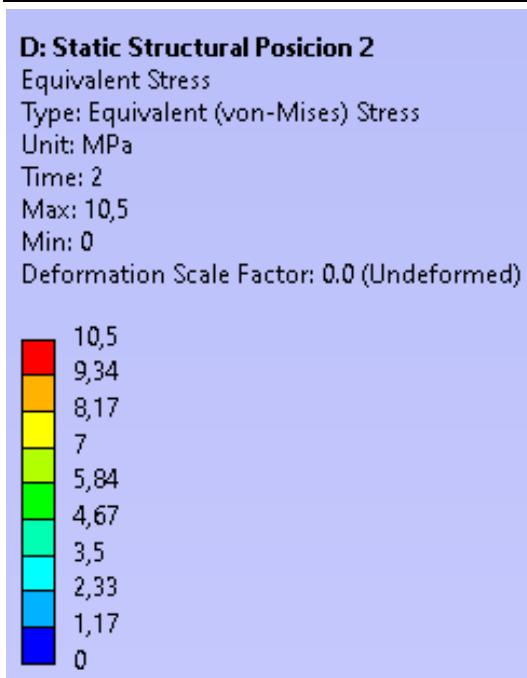


Figura 80: Tensión de Von Mises posición 2

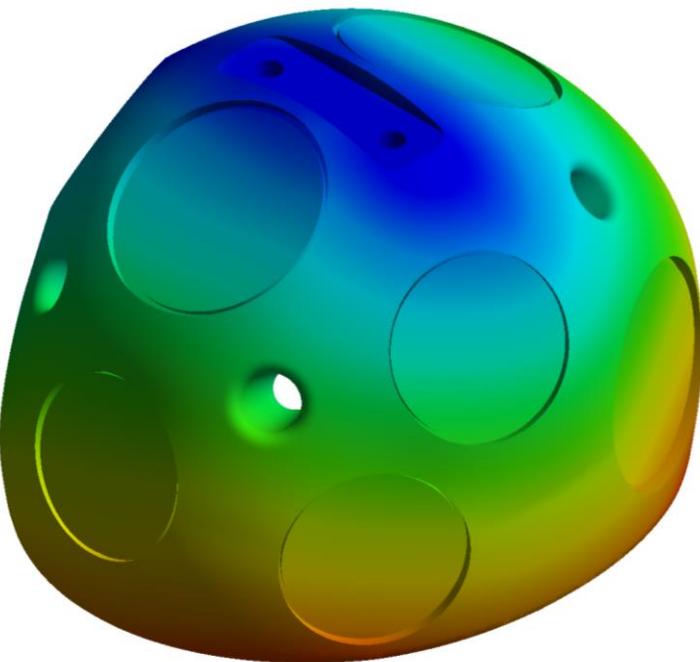


Figura 81: Deformación total posición 2

6.4.2.3 Resultados soporte

Para el soporte, se obtienen como en el caso anterior, unos valores mínimos, próximos a cero. Esto indica que el soporte aguanta a la perfección las cargas a las que se ve sometido, siendo estas solamente el peso de los componentes que se le acoplan, ya que las interacciones entre imanes no afectan a esta parte del diseño. Como se puede ver en las figuras a continuación la tensión de Von Mises es inferior a 1 y la deformación es inferior a la micra.

Estos resultados se deben a que el diseño del componente, cuenta con un redondeo de material en la zona de cambio de sección, en vez de, contar con un corte recto, lo cual favorece la disipación de tensiones. Además, cuenta con un grosor de 40 mm en su lado de menor tamaño, lo cual es suficiente para evitar cualquier tipo de deformación indeseable.

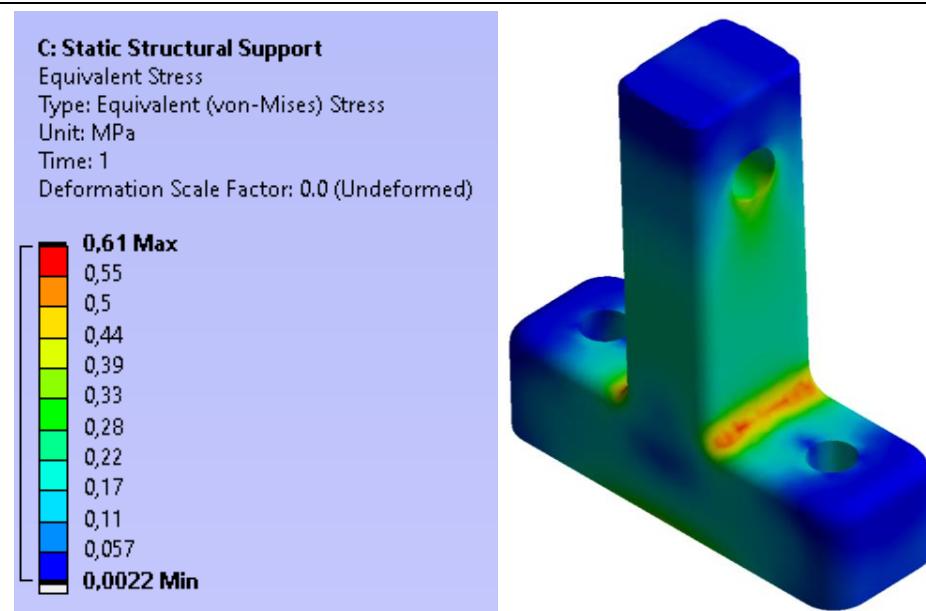


Figura 82: Tensión de Von Mises soporte

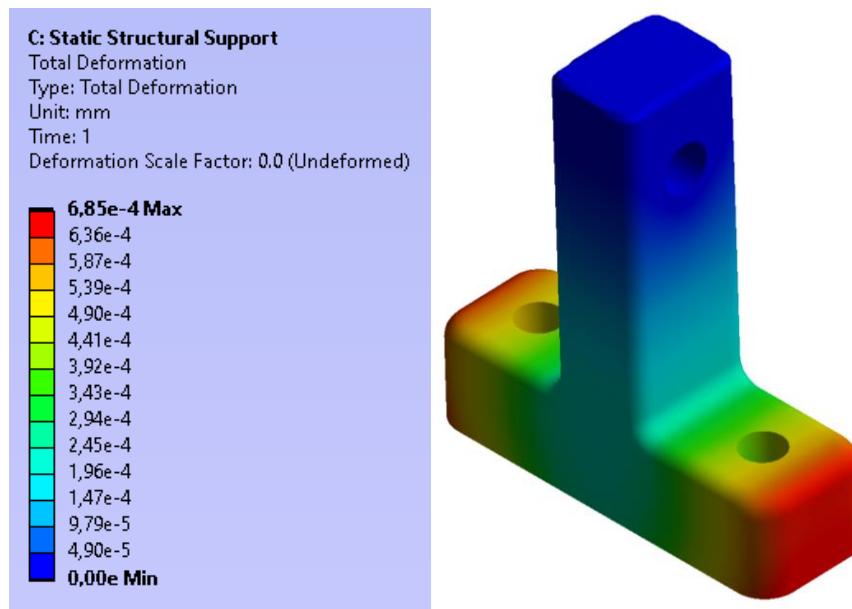


Figura 83: Deformación total soporte

7 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Tras realizar este Trabajo de Fin de Máster se han alcanzado los objetivos previamente establecidos de una manera satisfactoria, dado que a lo largo del desarrollo del mismo se ha llevado a cabo la realización de diferentes diseños, encontrando diversas complicaciones en el proceso. Cabe destacar que se ha partido de una idea que finalmente no se pudo llevar a cabo, debido a la complejidad de su fabricación. Debido a esto, se necesitó un reenfoque total, descartando las uniones por soldadura como estrategia inicial, empleando un bloque macizo como punto de partida, para su posterior mecanizado. Durante este proceso se han encontrado diversas complicaciones, ya que, para el optimizado de la geometría, se ha alternado el uso de SolidWorks y CatiaV5, trabajando en paralelo con sólidos y superficies para obtener el mejor resultado.

Durante el proceso que se ha desarrollado a lo largo del trabajo, se han abordado diversos aspectos técnicos, que incluyen la selección de materiales no ferromagnéticos, un aspecto fundamental en este caso, ya que, cualquier material que interactúe con los campos, puede crear alteraciones significativas durante el transcurso de la terapia. Para verificar esto, se realizan análisis del flujo y campo magnético, arrojando estos unos valores altamente satisfactorios, y que demuestran la correcta interacción entre los imanes.

También se consideró necesario obtener un producto que cumpliese con los requisitos estructurales, además de implementar diversos sistemas de seguridad tanto para el usuario como para el paciente. Esto se puede afirmar, ya que, a través de los análisis estructurales realizados, se concluye lo siguiente:

- Los resultados arrojan valores 20 veces superiores a los límites elásticos de cualquiera de los componentes en las zonas más desfavorables.
- La deformación es inferior a 40 micrómetros para todos los componentes en el caso más desfavorable.

Una vez finalizado todo esto, se llevó a cabo la realización de los diferentes planos de los componentes, para su posterior fabricación y consecuentemente, servir de complemento para este proyecto.

Por último, se ha realizado un presupuesto, el cual contempla todos los costes asociados a este proyecto, tanto a nivel de ingeniería como a nivel de materiales, ya sean comerciales o fabricados.

Como líneas futuras, dado que el soporte diseñado para acoplar el casco a la grúa no cuenta con ningún tipo de sistema de regulación para la posición, sería interesante estudiar y realizar algún tipo de sistema para suplir esta carencia. Otro aspecto a considerar de cara al futuro sería la posibilidad de implementar y desarrollar diversos tamaños para pacientes de diferentes edades, con la intención de ampliar el rango de edades en la aplicación de la terapia.

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Qué es y cómo se estructura el sistema nervioso - Neurocirugía de la Torre». <https://www.neurocirugiaequipodelatorre.es/que-es-y-como-se-estructura-el-sistema-nervioso> (accedido 20 de agosto de 2023).
- [2] D. M. J. D. la T. Gutiérrez, «Qué es y cómo se estructura el sistema nervioso», *Neurocirugía de la Torre*, 24 de agosto de 2021. <https://www.neurocirugiaequipodelatorre.es/que-es-y-como-se-estructura-el-sistema-nervioso> (accedido 28 de agosto de 2023).
- [3] «Sistema nervioso central (SNC)», *Kenhub*. <https://www.kenhub.com/es/library/anatomia-es/sistema-nervioso-central-snc> (accedido 28 de agosto de 2023).
- [4] «Formación Sociedad Española de Farmacia Hospitalaria». https://formasefh.sefh.es/tecnifarmh/courses/neurologia-y-psiquiatria/tema01_pagina01.php (accedido 28 de agosto de 2023).
- [5] «Anatomía del encéfalo - Sistema Nervioso - Clínica Alevia», *clinicaalevia.com*, 22 de septiembre de 2017. <https://www.clinicaalevia.com/anatomia-del-encefalo/> (accedido 28 de agosto de 2023).
- [6] «Tipos de enfermedades neurológicas | Neurología | Infosalus». <https://www.infosalus.com/enfermedades/neurologia/> (accedido 20 de agosto de 2023).
- [7] «Epilepsia: definición, causas y tratamiento», 11 de julio de 2016. <https://psicologiyamente.com/clinica/epilepsia> (accedido 20 de agosto de 2023).
- [8] «Epilepsia: tratamientos, síntomas, causas e información». <https://cuidateplus.marca.com/enfermedades/neurologicas/epilepsia.html> (accedido 28 de julio de 2023).
- [9] «¿Qué es la epilepsia? Definición y epidemiología de la epilepsia», *Apice, Asociación Andaluza de Epilepsia*. <https://www.apiceepilepsia.org/que-es-la-epilepsia/que-es-la-epilepsia-definicion/> (accedido 28 de julio de 2023).
- [10] «10_estatus_epileptico.pdf».
- [11] M. T. Vicente-Herrero, M. J. Terradillos García, L. Capdevila García, M. V. Ramírez Iñiguez de la Torre, Á. A. López-González, y E. Aguilar Jiménez, «La incapacidad laboral en epilepsia. Criterios de valoración», *Med. Fam. SEMERGEN*, vol. 42, n.º 2, pp. 103-109, mar. 2016, doi: 10.1016/j.semerg.2014.08.003.
- [12] «Epilepsia: causas, síntomas y pronóstico. Clínica Universidad de Navarra», <https://www.cun.es>. <https://www.cun.es/enfermedades-tratamientos/enfermedades/epilepsia> (accedido 20 de agosto de 2023).
- [13] «Los 7 tipos de fármacos anticonvulsivos (antiepilépticos)», 1 de agosto de 2017. <https://psicologiyamente.com/psicofarmacologia/farmacos-anticonvulsivos> (accedido 21 de agosto de 2023).
- [14] «Diagnóstico y tratamiento de la epilepsia», *Vivir con Epilepsia*, 31 de enero de 2023. <https://vivirconePILEPSIA.es/diagnostico-tratamiento-epilepsia> (accedido 20 de agosto de 2023).
- [15] «Tratamiento de la Epilepsia | Hospital Clínic Barcelona», *Clínic Barcelona*. <https://www.clinicbarcelona.org/asistencia/enfermedades/epilepsia/tratamiento> (accedido 20 de agosto de 2023).
- [16] «Estimulación magnética transcraneal de bajo campo - ScienceDirect». <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9788445817766500113> (accedido 28 de julio de 2023).
- [17] «Desde los orígenes al presente: las neurociencias de la conducta, un viaje que no se detiene. Por Yesenia Ruiz Oviedo timeline.», *Timetoast timelines*, 4999.

- <https://www.timetoast.com/timelines/desde-los-origenes-al-presente-las-neurociencias-de-la-conducta-un-viaje-que-no-se-detiene-por-yesenia-ruiz-oviedo> (accedido 21 de agosto de 2023).
- [18] M. Malavera, F. Silva, R. García, L. Rueda, y S. Carrillo, «Fundamentos y aplicaciones clínicas de la estimulación magnética transcraneal en neuropsiquiatría», *Rev. Colomb. Psiquiatr.*, vol. 43, n.º 1, pp. 32-39, mar. 2014, doi: 10.1016/S0034-7450(14)70040-X.
- [19] «Estimulación magnética transcraneal - Mayo Clinic». <https://www.mayoclinic.org/es/tests-procedures/transcranial-magnetic-stimulation/about/pac-20384625> (accedido 28 de julio de 2023).
- [20] «Estimulación magnética transcraneal para el tratamiento de la epilepsia». https://www.cochrane.org/es/CD011025/EPILEPSY_estimulacion-magnetica-transcraneal-para-el-tratamiento-de-la-epilepsia (accedido 28 de julio de 2023).
- [21] P. SL, «Imanes en la cabeza: un incipiente tratamiento para la epilepsia presentado en unas jornadas en Santiago», *Galiciapress*. <https://www.galiciapress.es/articulo/sanidad/2023-02-13/4174818-imanes-cabeza-incipiente-tratamiento-epilepsia-presentado-unas-jornadas-santiago> (accedido 21 de agosto de 2023).
- [22] «El casco que “reinicia” el cerebro llega a España: la nueva esperanza contra la depresión», *El Español*, 5 de mayo de 2019. https://www.elespanol.com/ciencia/salud/20190505/casco-reinicia-cerebro-llega-espana-esperanza-depresion/395711246_0.html (accedido 28 de agosto de 2023).
- [23] Mexpolimeros, «PA 12», *Polímeros termoplásticos, elastómeros y aditivos*. <https://www.mexpolimeros.com/pa12.html> (accedido 19 de agosto de 2023).
- [24] «PA12 Smooth - Polvo de poliamida 12 | Filament2Print». <https://filament2print.com/es/polvos/1085-pa12-smooth-polvo.html> (accedido 30 de agosto de 2023).
- [25] «Alibaba.com». https://www.alibaba.com/pla/High-Grade-7075-T6-Aluminum-Sheet_62198774489.html?mark=google_shopping&biz=pla&searchText=aluminum+sheets&product_id=62198774489&pcy=US&language=es&src=sem_ggl&field=UG&from=sem_ggl&cmpgn=18342781580&adgrp=&fditm=&tgt=&locintrst=&locphyscl=1005518&mtchty=p=&ntwrk=x&device=c&dvcmdl=&creative=&plcmnt=&plcmntcat=&aceid=&position=&clid=Cj0KCQjw0bunBhD9ARIsAAZl0E3aTRrfUVQG4Dq42zjgAssxFe24G5bcMtj4h1EE6DoFgNT4qjypyrmAjkEALw_wcB (accedido 30 de agosto de 2023).
- [26] S. Torras, «TORNILLO TITANIO ALLEN DIN-912 M-5X20 TI GR2», *Tienda web Suministros Torras*. <https://www.suministrotorras.com/es/productos/182008/tornillo-titanio-allen-din-912-m-5x20-ti-gr2-168180/> (accedido 18 de agosto de 2023).
- [27] «China Grado 5 DIN 985 Ti6Al4V de nylon de aleación de titanio de traba tuercas para tornillo de bicicletas Fotos e Imágenes - Made-in-china.com». https://es.made-in-china.com/co_kingtitanium/image_DIN-985-Grade-5-Ti6al4V-Alloyed-Nylon-Lock-Titanium-Nuts-for-Bike-Bolt_rryesryyg_2f1j00tIMUEeazVibK.html (accedido 27 de agosto de 2023).
- [28] «| TORNILLOS DE TITANIO». <https://www.tornillosdetitanio.com/b2c/producto/din912m12x70gr5/1/tornillo-din-912-m12x70-mm-titanio-gr-5-6al4v-> (accedido 18 de agosto de 2023).
- [29] «▷Grúa Hidráulica Traslado con Arnés», *Dortomedical*. <https://dortomedical.com/gruas-movilizacion-de-pacientes/1033-grua-elevacion-y-traslado-hidraulica-a-pedal-con-arnes-hasta-135-kg.html> (accedido 27 de agosto de 2023).
- [30] «Explicación sobre magnetización/calidad: N42, N45, etc. - supermagnete.es». <https://www.supermagnete.es/faq/Preguntas-y-respuestas-sobre-la-calidad-de-los-imanes> (accedido 10 de agosto de 2023).

- [31] «Imán de neodimio en disco redondo medidas 70x45mm 300 kg. D-70-45», *Superimanes S.L.* <https://www.superimanes.com/imanes-de-neodimio/discos/iman-neodimio-disco-70x45-mm> (accedido 10 de agosto de 2023).
- [32] «Imán de neodimio en disco redondo D-50-40. Medidas 50x40mm 170 kg.», *Superimanes S.L.* <https://www.superimanes.com/imanes-de-neodimio/discos/iman-neodimio-disco-50x40-mm> (accedido 10 de agosto de 2023).
- [33] «How Element Quality is Calculated». https://2021.help.altair.com/2021/hwdesktop/hm/topics/pre_processing/meshing/element_quality_how_its_calculated_c.htm#element_quality_calculations_hypermesh_r_reference_e1w_q11_z3b_Untitled11_dlentry_g2x_xyy_yfb (accedido 20 de julio de 2023).
- [34] «Neodymium, Nd». https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=61dbbf5b1f34464984735709ef1ee38c (accedido 19 de agosto de 2023).
- [35] «Aluminio 7075 - Propiedades, resistencia y usos - Conocimiento - Cangzhou Yizeng Industry Co., Ltd», *Cangzhou Yizeng Industria Co., Ltd.* <https://www.czyzindustry.com/info/7075-aluminum-properties-strength-and-uses-58083093.html> (accedido 10 de agosto de 2023).
- [36] «ASM Material Data Sheet». <https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=ma7075t6> (accedido 23 de agosto de 2023).
- [37] «PA12 Smooth», *Sinterit – Manufacturer of compact and industrial SLS 3D printers.* <https://sinterit.com> (accedido 30 de agosto de 2023).
- [38] «Overview of materials for Nylon 12». <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=0e37a459c4eb452faa9d92659f9a0ccc&ckck=1> (accedido 30 de agosto de 2023).
- [39] «SANMETAL, S.A. - Division Termoplásticos : Poliamida 12 - PA 12». <https://www.sanmetal.es/productos/termoplasticos/poliamida-12-pa-12/54> (accedido 19 de agosto de 2023).
- [40] «| TORNILLOS DE TITANIO». <https://www.tornillosdetitanio.com/b2c/producto/din125m12gr5/1/arandela-din-125-m12-de-titanio-gr-5-6al4v-> (accedido 27 de agosto de 2023).
- [41] «| TORNILLOS DE TITANIO». <https://www.tornillosdetitanio.com/b2c/producto/tuercadin985m12gr5/1/tuerca-din-985-m12x1-75-autoblocante-de-titanio-gr-5-6al4v-> (accedido 18 de agosto de 2023).
- [42] «Superimanes. Imanes de neodimio, ferrita y flexibles.», *Superimanes S.L.* <https://www.superimanes.com/> (accedido 10 de agosto de 2023).

9 ANEXOS

9.1 Fichas técnicas tornillería

9.1.1 DIN 912

Tabla 13: Características DIN 912 [28]

Material	Titanio grado 5 (6Al4V)
Métrica	M12
Longitud tornillo	70 mm
Diámetro cabeza	18 mm
Altura cabeza	12 mm
Llave de instalación	Allen 10 mm
Paso de rosca	1.75 mm

9.1.2 DIN 125

Tabla 14: Características DIN 125 [40]

Material	Titanio grado 5 (6Al4V)
Métrica	M12
Diámetro interior	13 mm
Diámetro exterior	24 mm
Grosor arandela	2.5 mm

9.1.3 DIN 985

Tabla 15: Características DIN 985 [41]

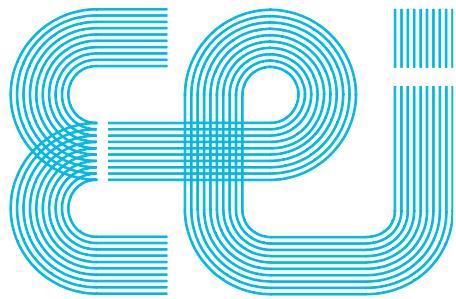
Material	Titanio grado 5 (6Al4V)
Métrica	M12
Altura tuerca	12 mm
Llave de instalación	Hexagonal de 19 mm
Paso de rosca	1.75 mm

9.2 Propiedades imanes de neodimio

9.2.1 Propiedades magnéticas

Tabla 16: Propiedades de coercitividad y remanencia de los imanes de Neodimio [42]

Properties	Max Energy Product	Remanence	Coercive Force	Intrinsic Coercive Force	Temp Coefficient		Curie Temp	Max Working Temp
	(BH) _{max}	Br	H _{cB}	H _{ci}	αBr	βH _{ci}	T _c	T _w
	KJ/m ³ (MGoe)	mT(KGs)	KA/m(KOe)	KA/m(KOe)	%/°C	%/°C	°C	°C
N35	263-287(33-36)	1170-1220(11.7-12.2)	≥868(≥10.9)	≥955(≥12)	-0.12	-0.6	310	≤80
N38	287-310(36-39)	1220-1250(12.2-12.5)	≥899(≥11.3)	≥955(≥12)	-0.12	-0.6	310	≤80
N40	302-326(38-41)	1250-1280(12.5-12.8)	≥907(≥11.4)	≥955(≥12)	-0.12	-0.6	310	≤80
N42	318-342(40-43)	1280-1320(12.8-13.2)	≥915(≥11.5)	≥955(≥12)	-0.12	-0.6	310	≤80
N45	342-366(43-46)	1320-1380(13.2-13.8)	≥923(≥11.6)	≥955(≥12)	-0.12	-0.6	310	≤80
N48	366-390(46-49)	1380-1420(13.8-14.2)	≥923(≥11.6)	≥876(≥11)	-0.12	-0.6	310	≤80
N50	382-406(48-51)	1400-1450(14.0-14.5)	≥796(≥10.0)	≥876(≥11)	-0.11	-0.85	320	≤60
N52	398-422(50-53)	1430-1480(14.3-14.8)	≥796(≥10.0)	≥876(≥11)	-0.11	-0.85	320	≤60
N55	414-446(52-56)	1460-1520(14.6-15.2)	≥716(≥9.0)	≥876(≥11)	-0.12	-0.85	320	≤60
N35M	263-287(33-36)	1170-1220(11.7-12.2)	≥868(≥10.9)	≥1114(≥14)	-0.12	-0.59	320	≤100
N38M	287-310(36-39)	1220-1250(12.2-12.5)	≥899(≥11.3)	≥1114(≥14)	-0.12	-0.59	320	≤100
N40M	302-326(38-41)	1250-1280(12.5-12.8)	≥923(≥11.6)	≥1114(≥14)	-0.12	-0.59	320	≤100
N42M	318-342(40-43)	1280-1320(12.8-13.2)	≥955(≥12.0)	≥1114(≥14)	-0.12	-0.59	320	≤100
N45M	342-366(43-46)	1320-1380(13.2-13.8)	≥995(≥12.5)	≥1114(≥14)	-0.12	-0.59	320	≤100
N48M	366-390(46-49)	1360-1430(13.6-14.3)	≥1027(≥12.9)	≥1114(≥14)	-0.11	-0.8	320	≤100
N50M	382-406(48-51)	1400-1450(14.0-14.5)	≥1033(≥13.0)	≥1114(≥14)	-0.11	-0.8	320	≤100
N52M	390-422(49-53)	1420-1470(14.2-14.7)	≥995(≥12.5)	≥1035(≥13)	-0.11	-0.8	320	≤100
N35H	263-287(33-36)	1170-1220(11.7-12.2)	≥868(≥10.9)	≥1353(≥17)	-0.11	-0.58	320-350	≤120
N38H	287-310(36-39)	1220-1260(12.2-12.5)	≥899(≥11.3)	≥1353(≥17)	-0.11	-0.58	320-350	≤120
N40H	302-326(38-41)	1250-1280(12.5-12.8)	≥923(≥11.6)	≥1353(≥17)	-0.11	-0.58	320-350	≤120
N42H	318-342(40-43)	1280-1320(12.8-13.2)	≥955(≥12.0)	≥1353(≥17)	-0.11	-0.58	320-350	≤120
N45H	342-359(43-46)	1300-1360(13.0-13.6)	≥963(≥12.1)	≥1353(≥17)	-0.12	-0.75	350	≤120
N48H	358-390(46-49)	1370-1430(13.7-14.3)	≥995(≥12.5)	≥1353(≥17)	-0.12	-0.75	350	≤120
N50H	374-406(47-51)	1390-1440(13.9-14.4)	≥1035(≥13.0)	≥1592(≥20)	-0.12	-0.75	350	≤120
N35SH	263-287(33-36)	1170-1220(11.7-12.2)	≥876(≥11.0)	≥1274(≥16)	-0.11	-0.55	340-360	≤150
N38SH	287-310(36-39)	1220-1250(12.2-12.5)	≥907(≥11.4)	≥1592(≥20)	-0.11	-0.55	340-360	≤150
N40SH	302-326(38-41)	1250-1280(12.5-12.8)	≥939(≥11.8)	≥1592(≥20)	-0.11	-0.55	340-360	≤150
N42SH	318-342(40-43)	1280-1320(12.8-13.2)	≥987(≥12.4)	≥1592(≥20)	-0.11	-0.6	380	≤150
N45SH	342-366(43-46)	1320-1380(13.2-13.8)	≥1003(≥12.6)	≥1592(≥20)	-0.12	-0.6	380	≤150
N30UH	223-247(28-31)	1080-1130(10.8-11.3)	≥812(≥10.2)	≥1990(≥25)	-0.11	-0.51	350-380	≤180
N33UH	247-271(31-34)	1130-1170(11.3-11.7)	≥852(≥10.7)	≥1990(≥25)	-0.11	-0.51	350-380	≤180
N35UH	263-287(33-36)	1180-1220(11.8-12.2)	≥860(≥10.8)	≥1990(≥25)	-0.1	-0.55	380	≤180
N38UH	287-310(36-39)	1220-1250(12.2-12.5)	≥876(≥11.0)	≥1990(≥25)	-0.1	-0.55	380	≤180
N40UH	302-326(38-41)	1240-1280(12.4-12.8)	≥899(≥11.3)	≥1990(≥25)	-0.1	-0.55	380	≤180
N30EH	223-247(28-31)	1080-1130(10.8-11.3)	≥812(≥10.2)	≥2388(≥30)	-0.11	-0.51	380	≤200
N33EH	247-271(31-34)	1130-1170(11.3-11.7)	≥836(≥10.5)	≥2388(≥30)	-0.09	-0.5	380	≤200
N35EH	263-287(33-36)	1170-1220(11.7-12.2)	≥876(≥11.0)	≥2388(≥30)	-0.09	-0.5	380	≤200
N38EH	287-310(36-39)	1220-1250(12.2-12.5)	≥899(≥11.3)	≥2388(≥30)	-0.09	-0.5	390	≤200
N40EH	302-326(38-41)	1250-1290(12.5-12.9)	≥971(≥12.2)	≥2308(≥29)	-0.09	-0.5	380	≤200
N33AH	239-271(30-34)	1110-1170(11.1-11.7)	≥836(≥10.5)	≥2706(≥34)	-0.09	-0.5	390	≤230
N35AH	263-287(33-36)	1170-1220(11.7-12.2)	≥883(≥11.1)	≥2706(≥34)	-0.09	-0.5	380	≤230



Escuela de Ingeniería Industrial

TRABAJO FIN DE MASTER

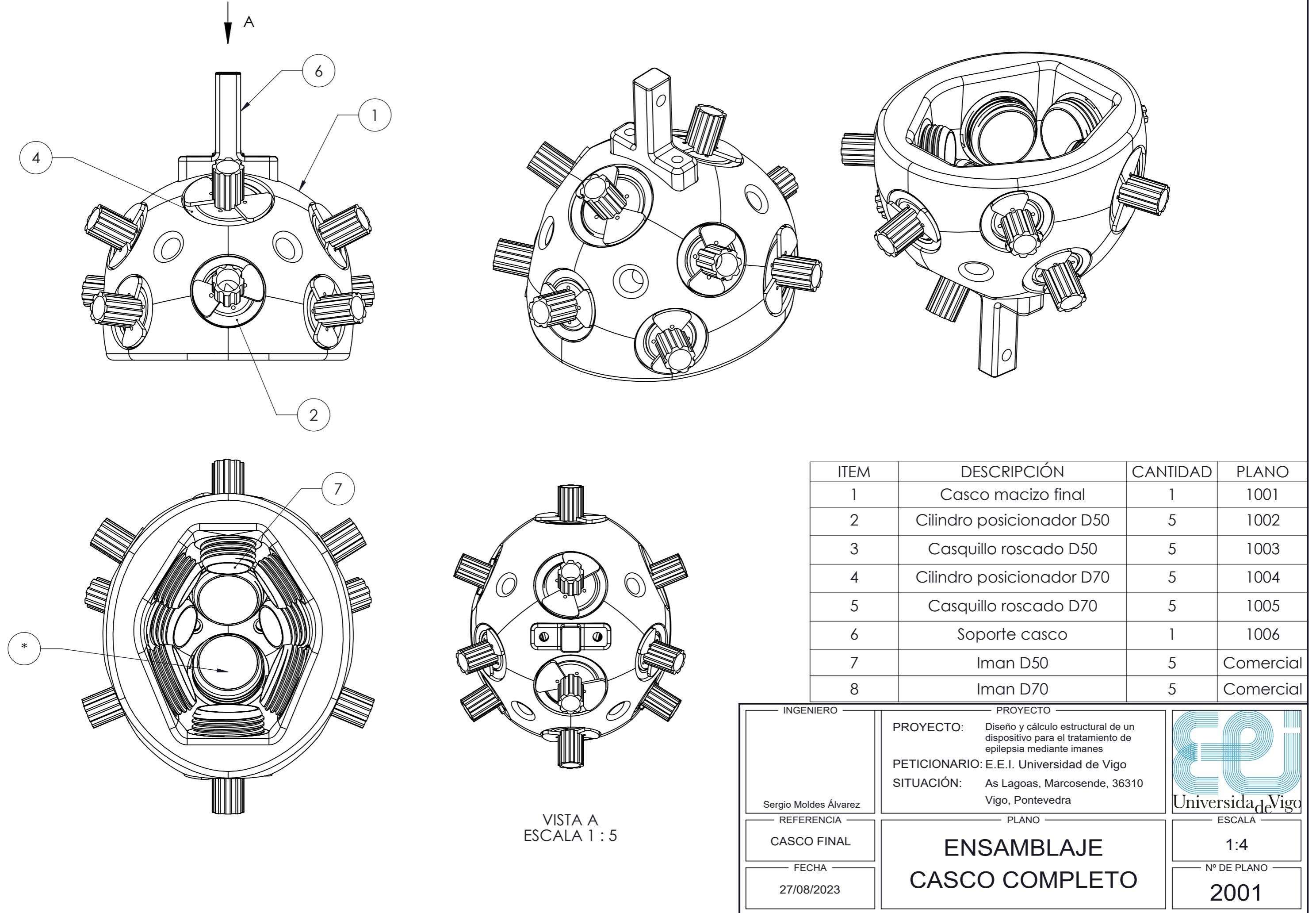
*Diseño y cálculo estructural de un dispositivo para el
tratamiento de epilepsia mediante imanes.*

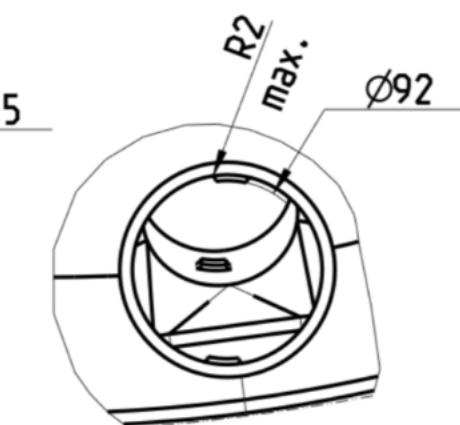
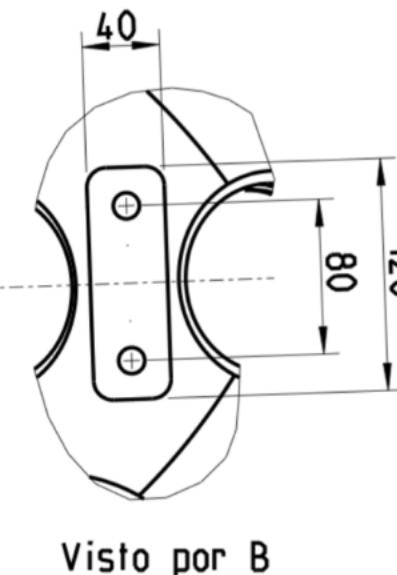
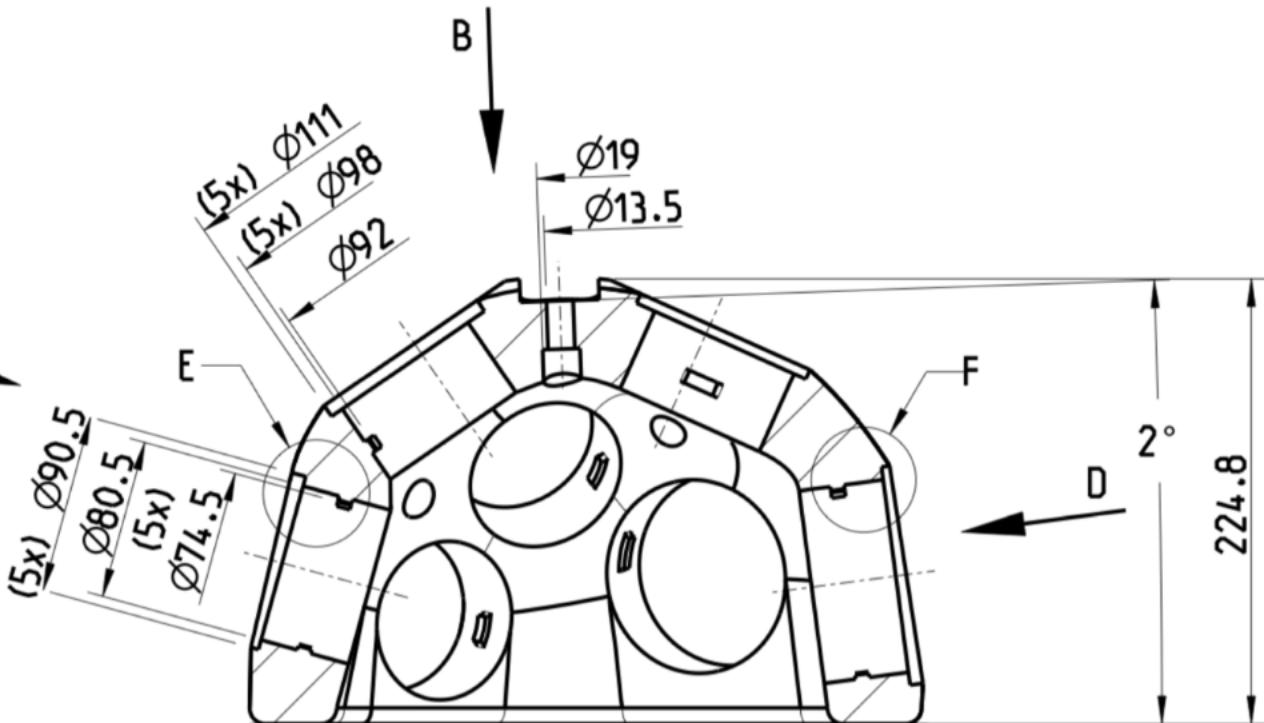
Máster en Ingeniería en Industrial

Documento

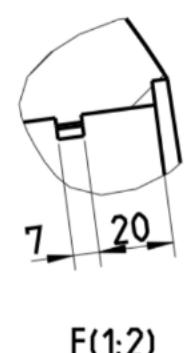
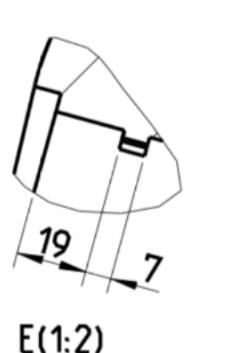
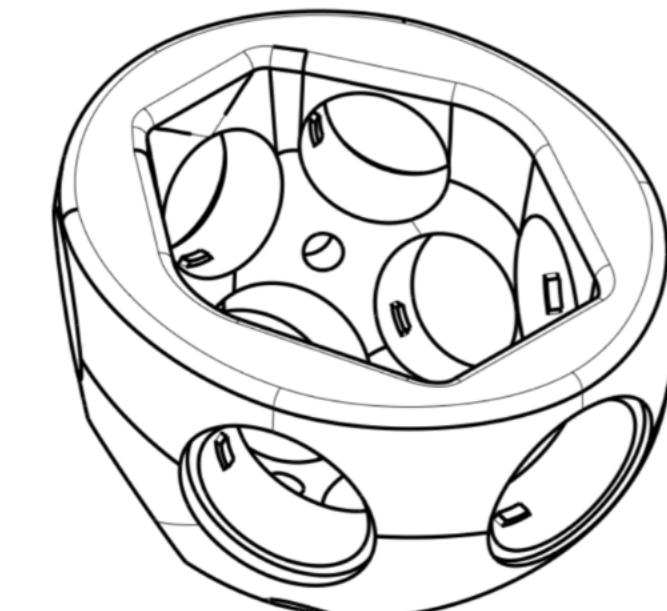
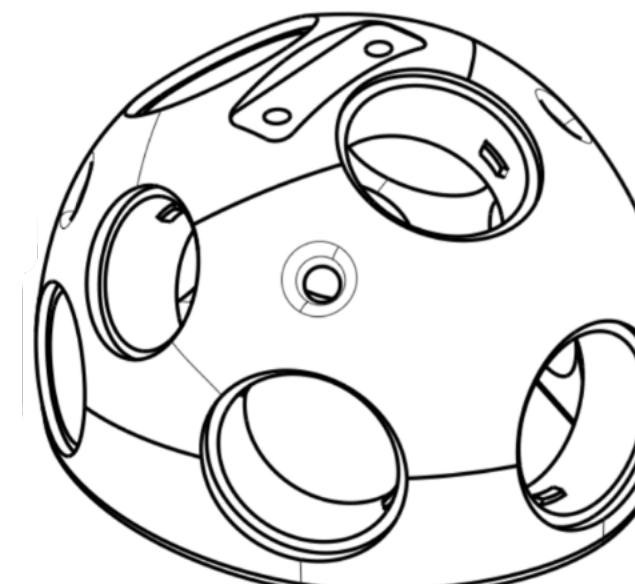
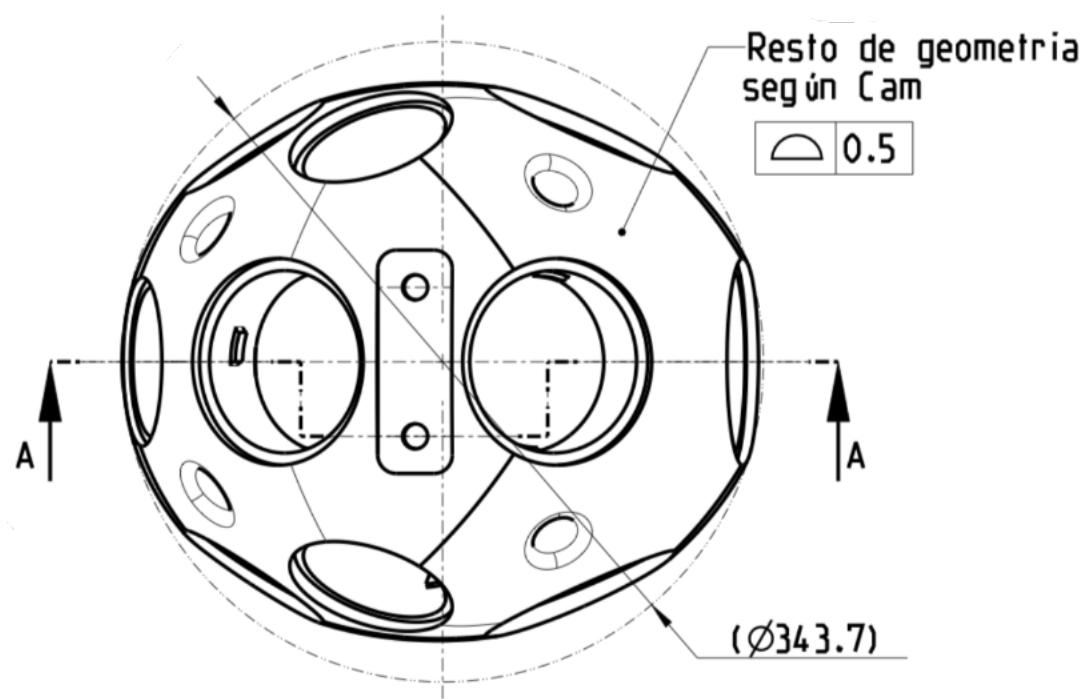
PLANOS

Universida_de Vigo



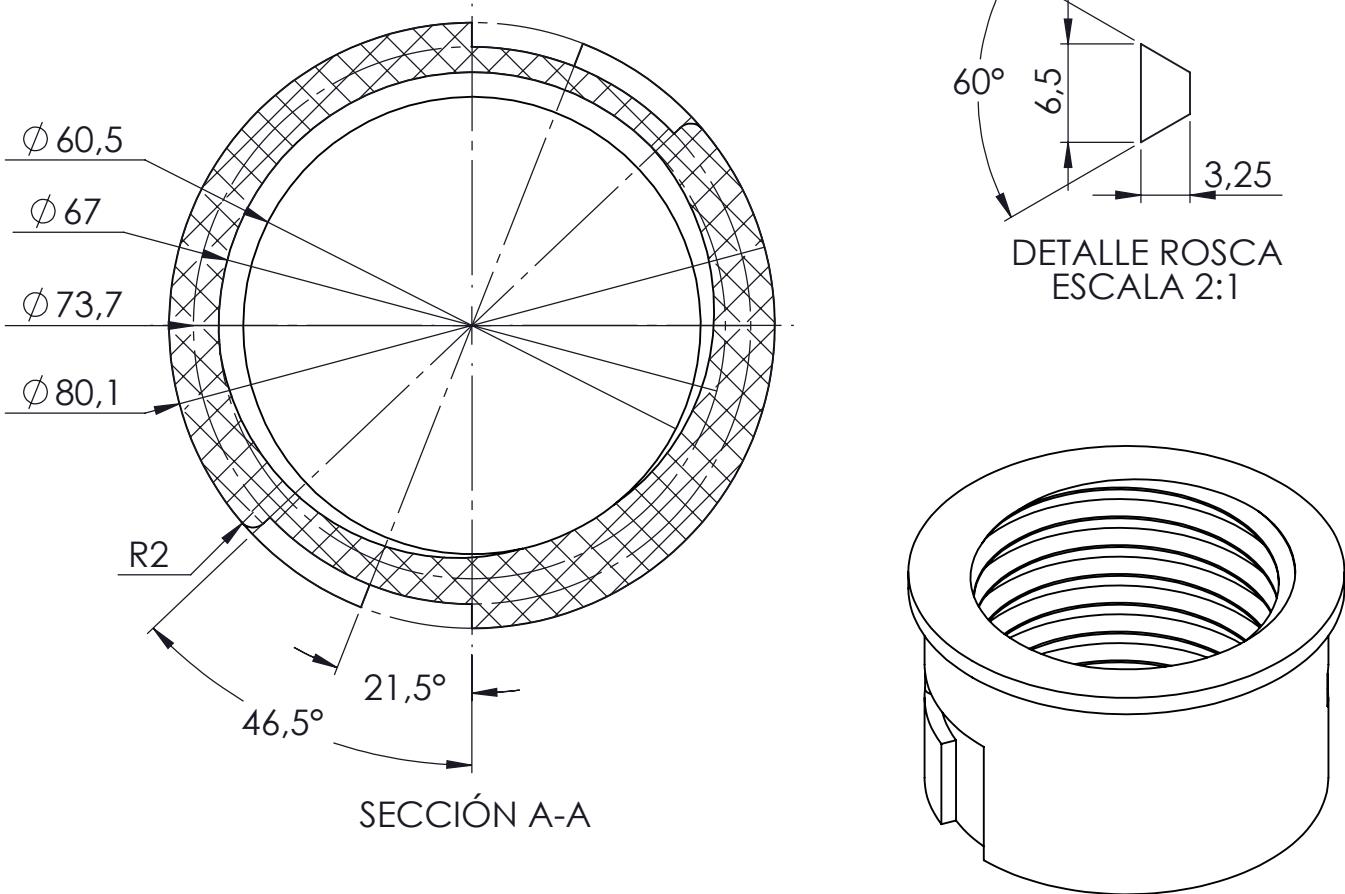
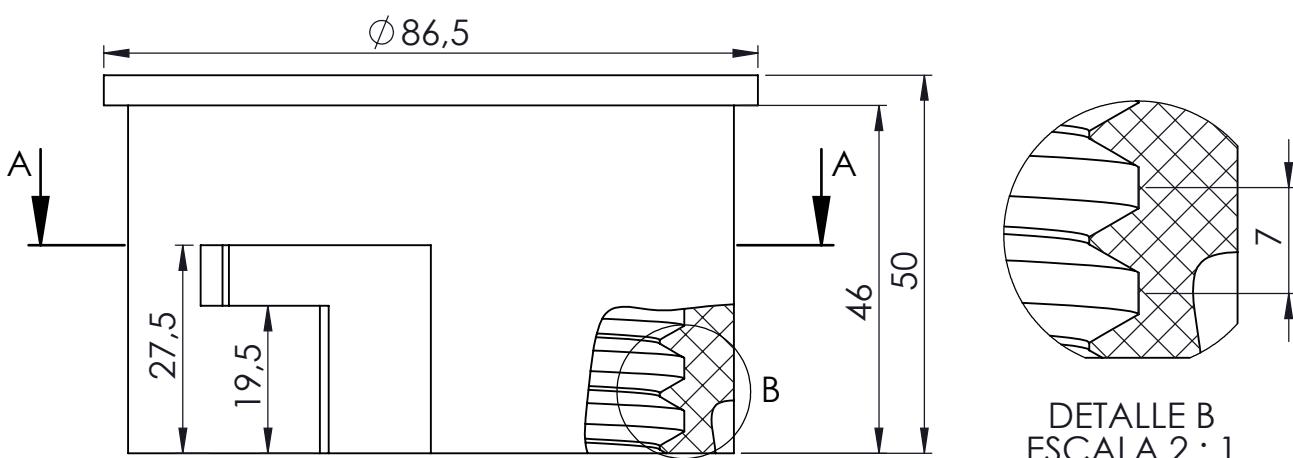


A-A

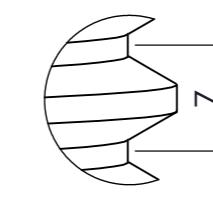
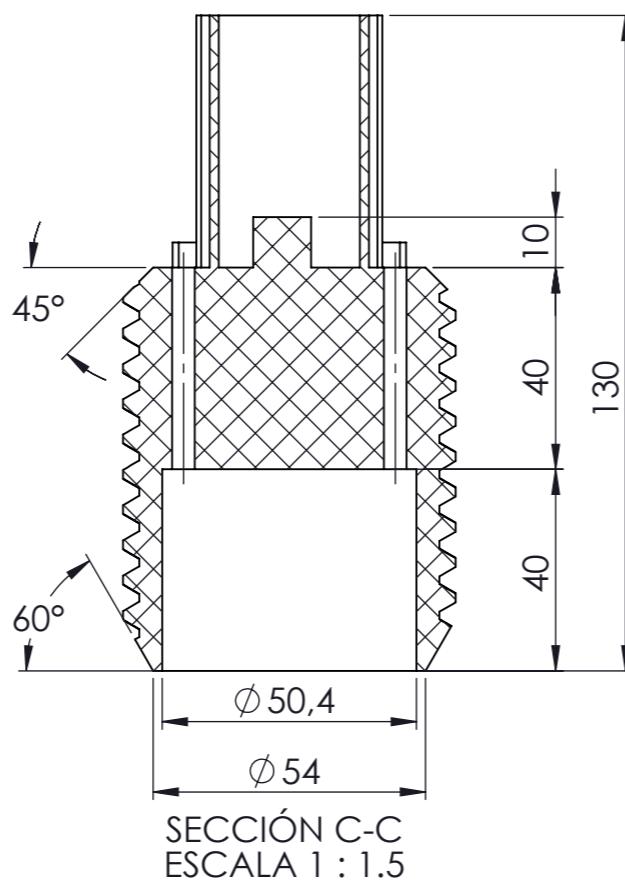
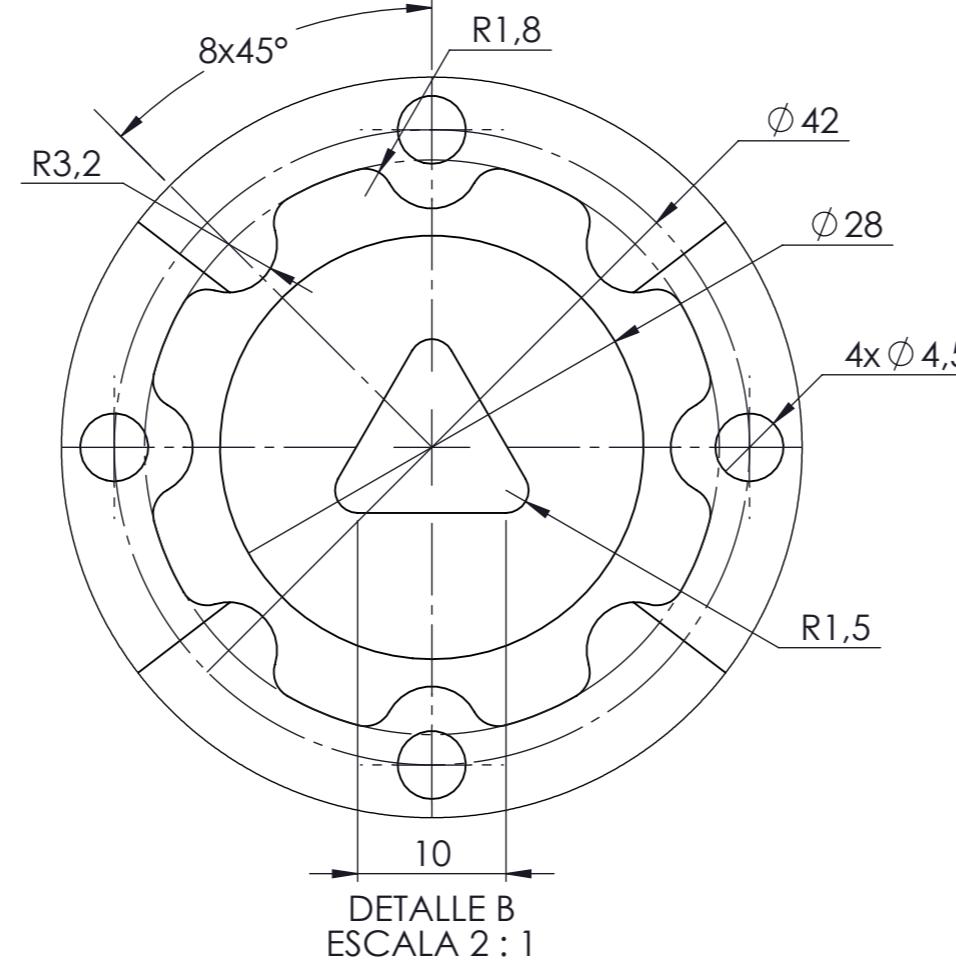
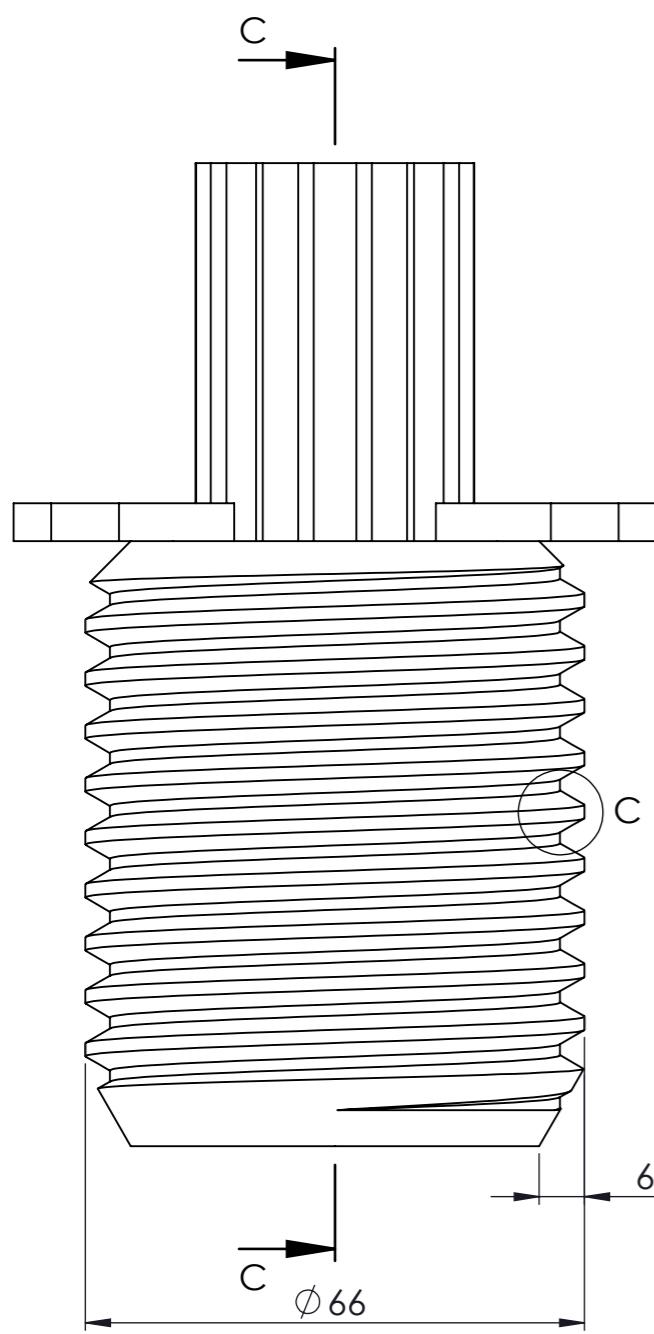
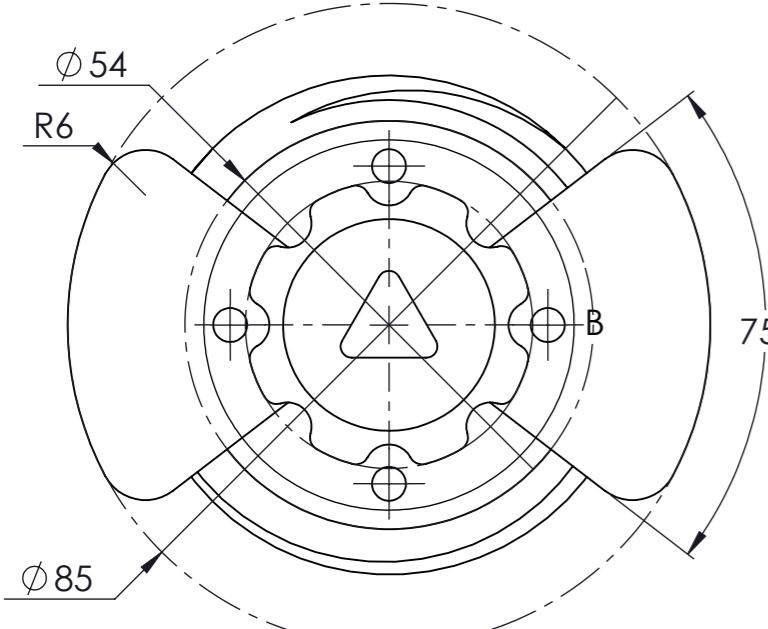


INGENIERO	PROYECTO
Sergio Moldes Álvarez	Diseño y cálculo estructural de un dispositivo para el tratamiento de epilepsia mediante imanes
REFERENCIA	PETICIONARIO: E.E.I. Universidad de Vigo
CASCO FINAL	SITUACIÓN: As Lagoas, Marcosende, 36310 Vigo, Pontevedra
FECHA	PLANO
28/08/2023	CASCO MACIZO FINAL
	ESCALA
	1:4
	Nº DE PLANO
	1001

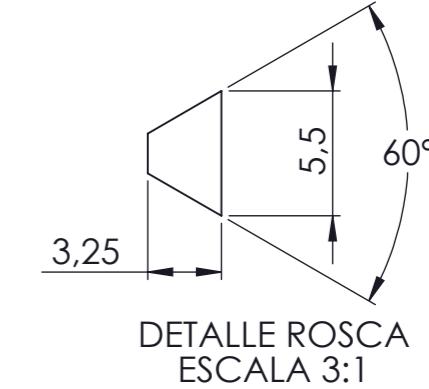




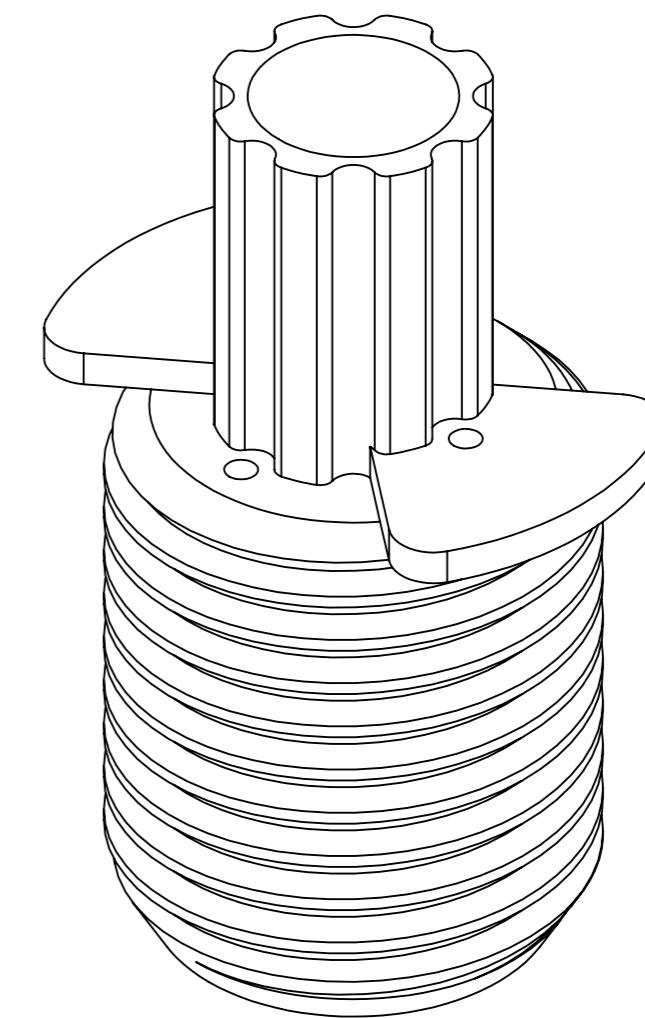
INGENIERO	PROYECTO	
Sergio Moldes Álvarez	Diseño y cálculo estructural de un dispositivo para el tratamiento de epilepsia mediante imanes	
REFERENCIA	PETICIONARIO: E.E.I. Universidad de Vigo	
CASCO FINAL	SITUACIÓN: As Lagoas, Marcosende, 36310	
FECHA	Vigo, Pontevedra	
28/08/2023	PLANO	
	CILINDRO	ESCALA
	POSICIONADOR D50	1:1
		Nº DE PLANO
		1002



DETALLE C
ESCALA 2 : 1



DETALLE ROSCA
ESCALA 3:1



INGENIERO	PROYECTO
Sergio Moldes Álvarez	Diseño y cálculo estructural de un dispositivo para el tratamiento de epilepsia mediante imanes
REFERENCIA	PETICIONARIO: E.E.I. Universidad de Vigo
CASCO FINAL	SITUACIÓN: As Lagoas, Marcosende, 36310
FECHA	Vigo, Pontevedra
28/08/2023	PLANO
CASQUILLO ROSCADO D50	
ESCALA	1:1
Nº DE PLANO	1003



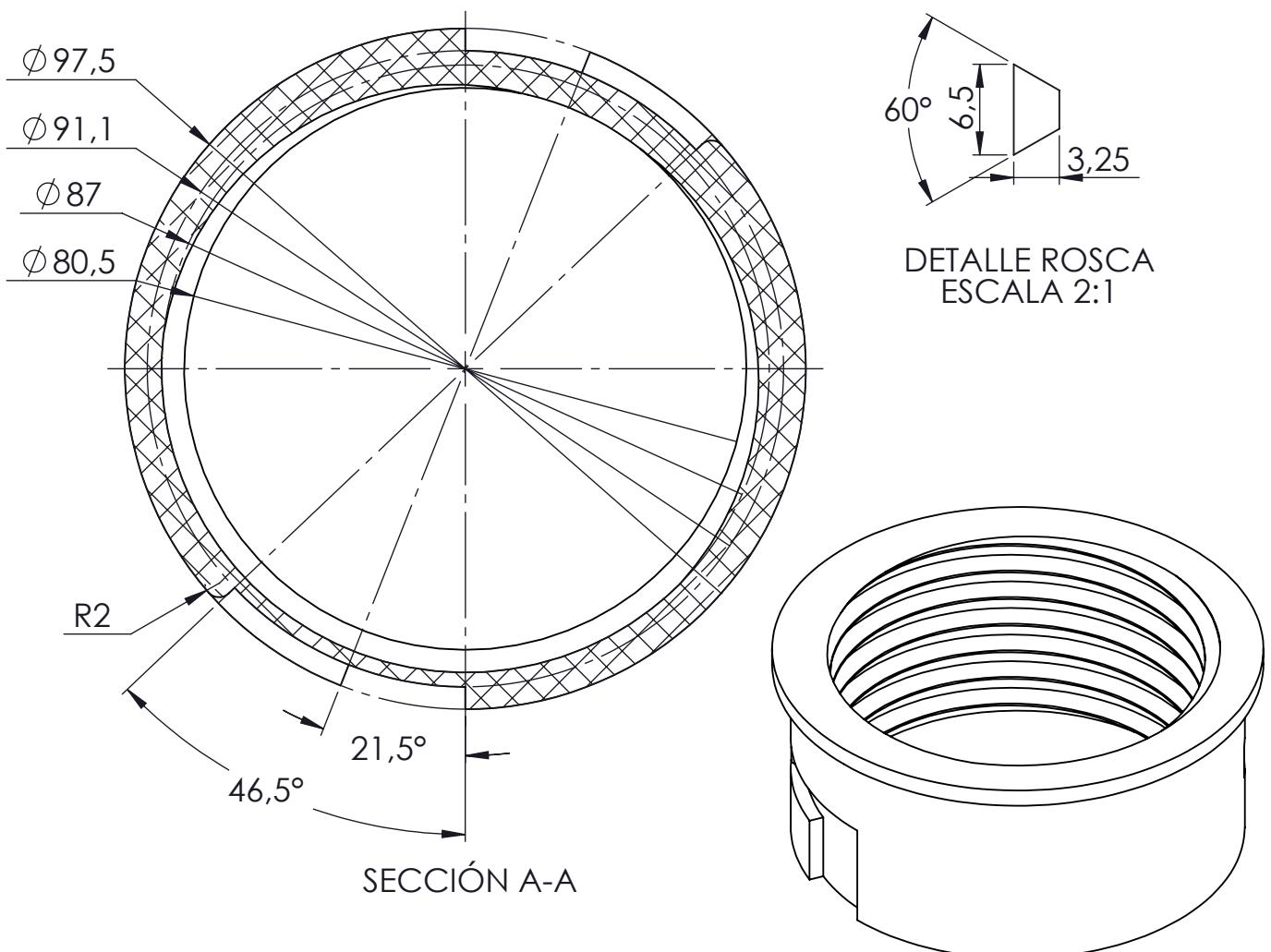
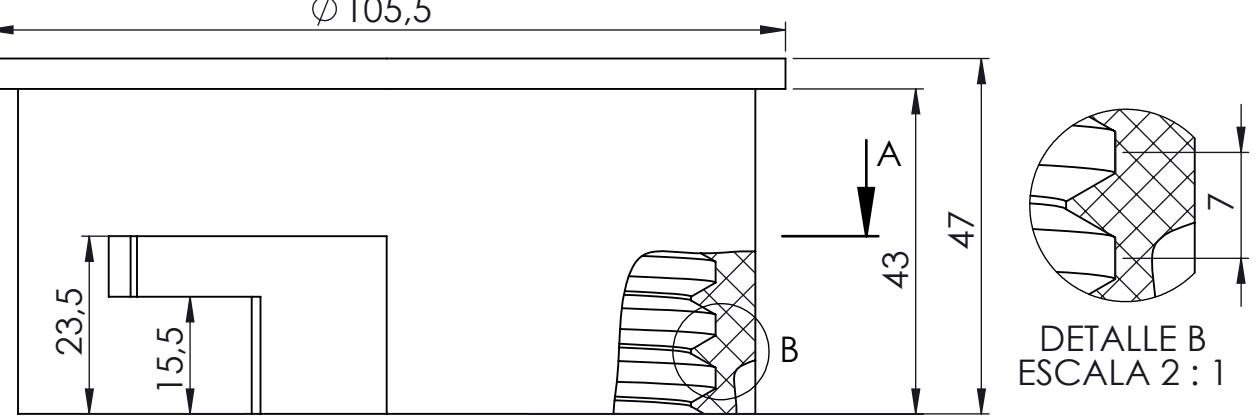
Universidade de Vigo

ESCALA

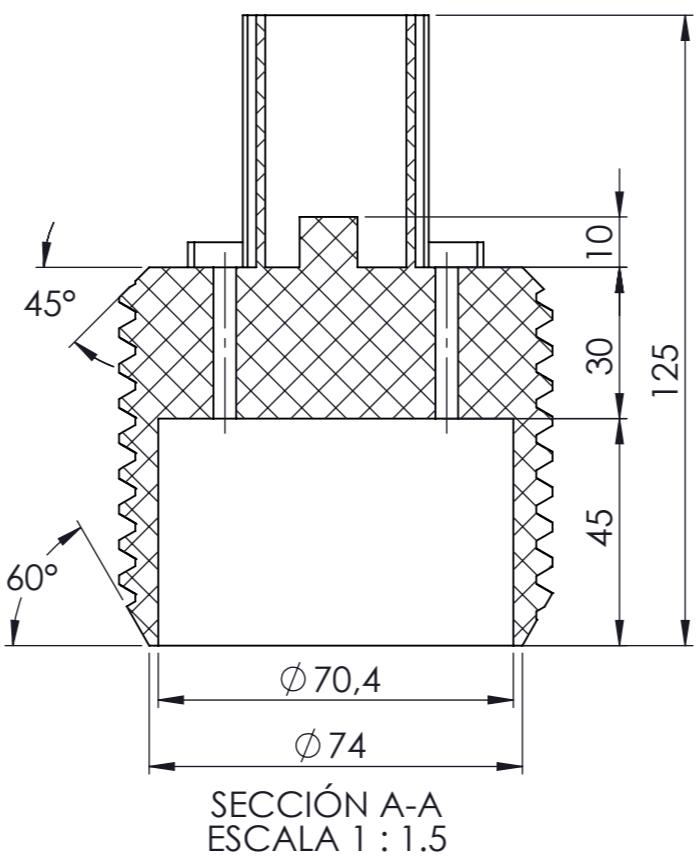
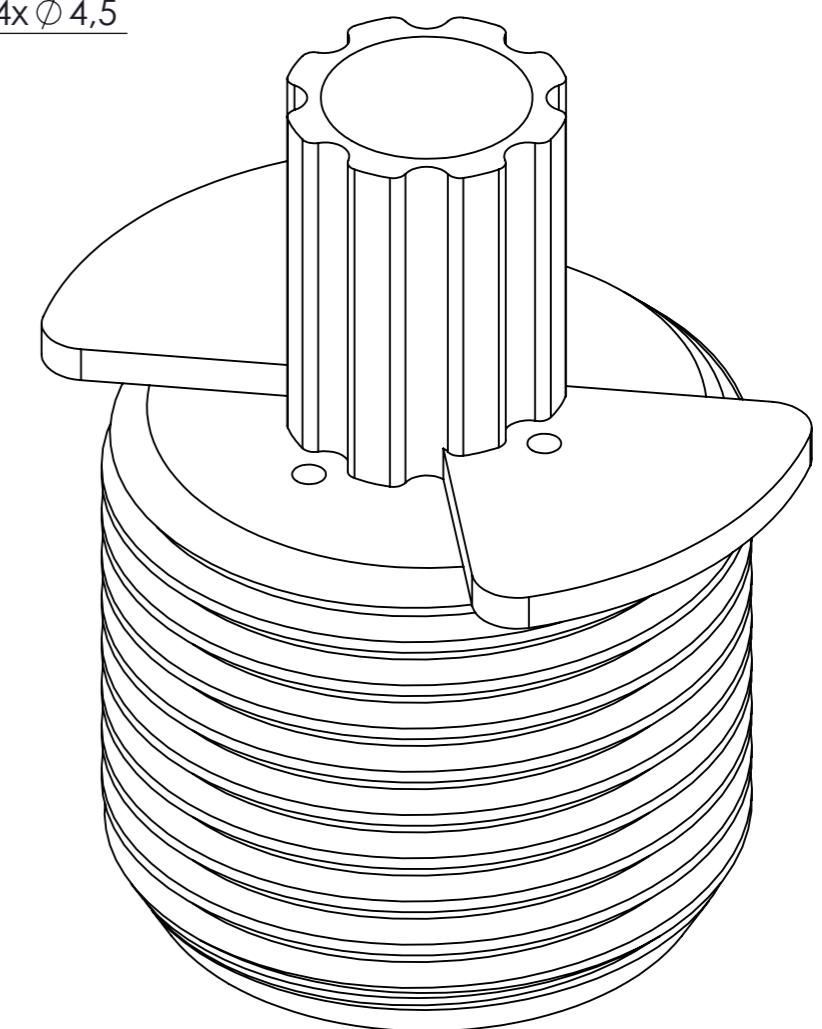
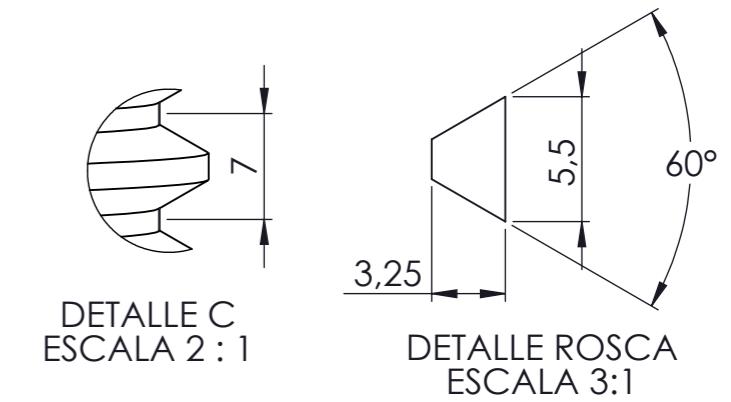
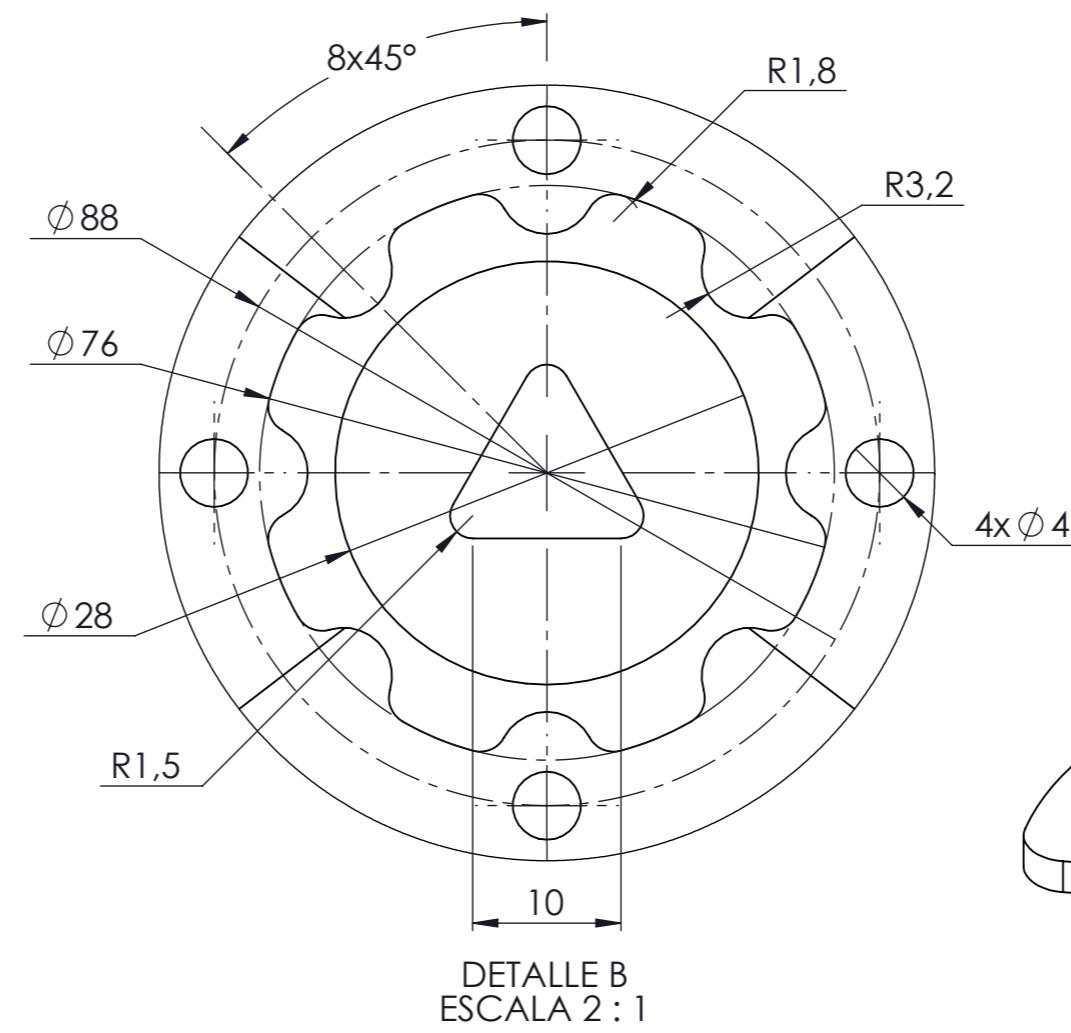
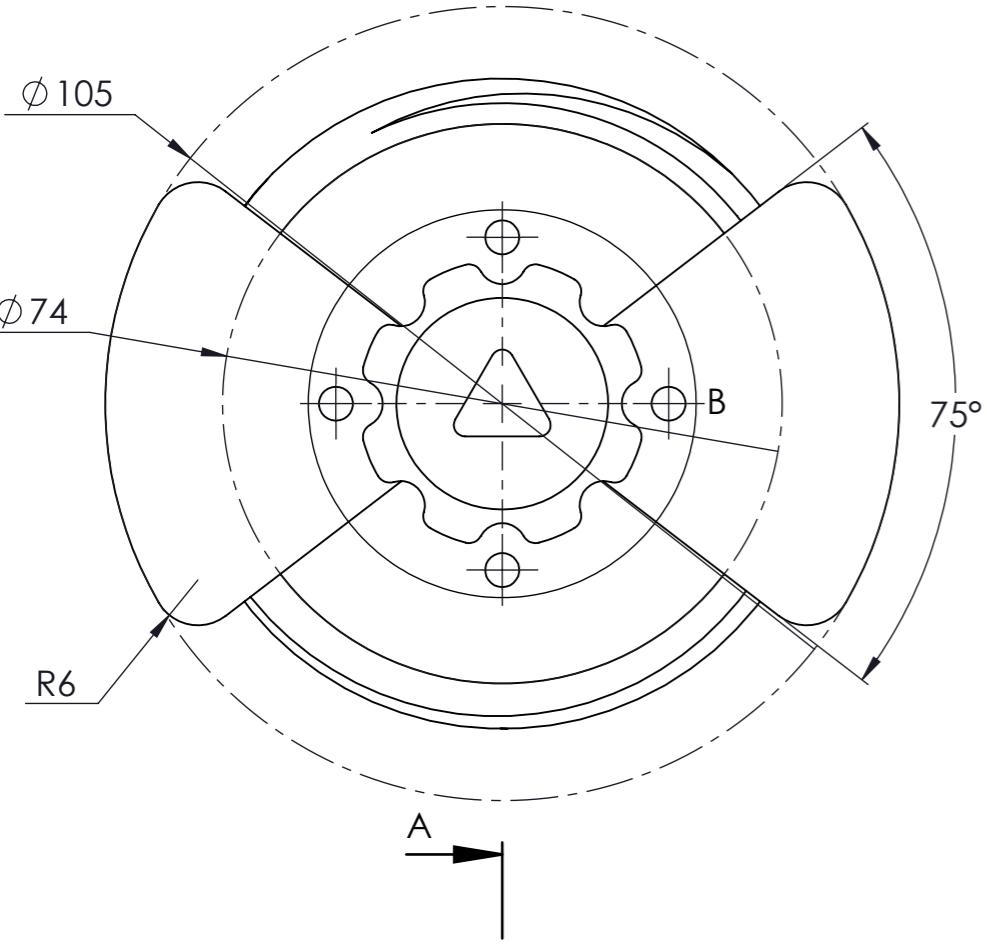
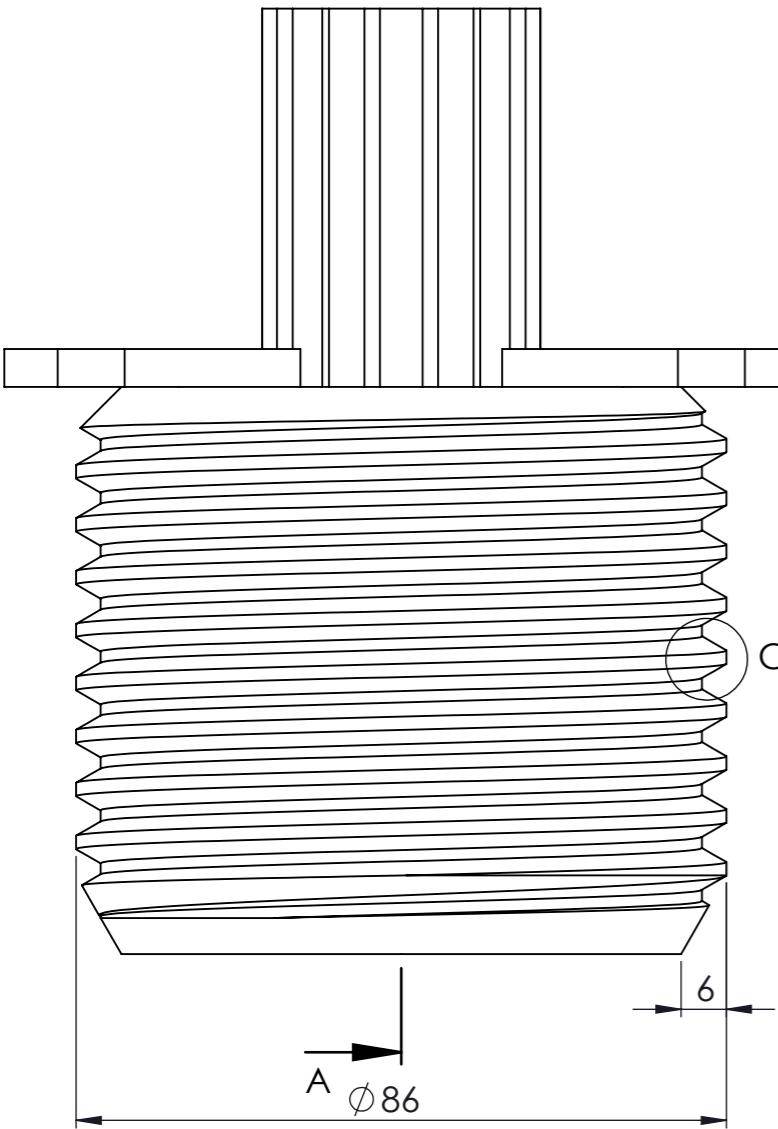
1:1

Nº DE PLANO

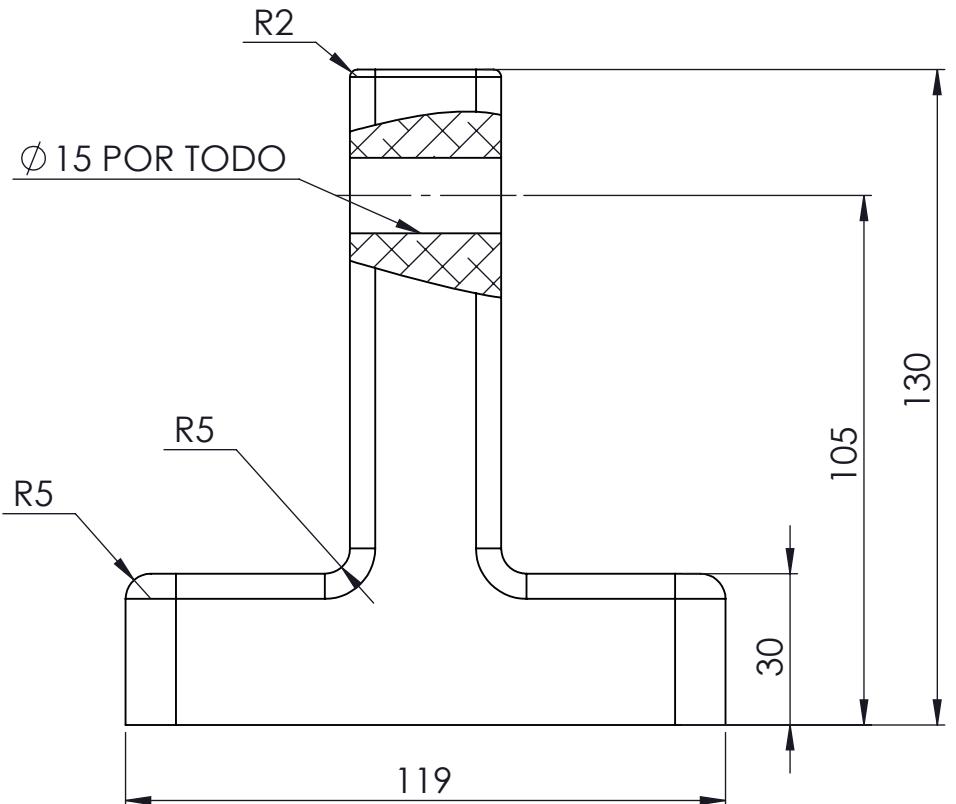
1003



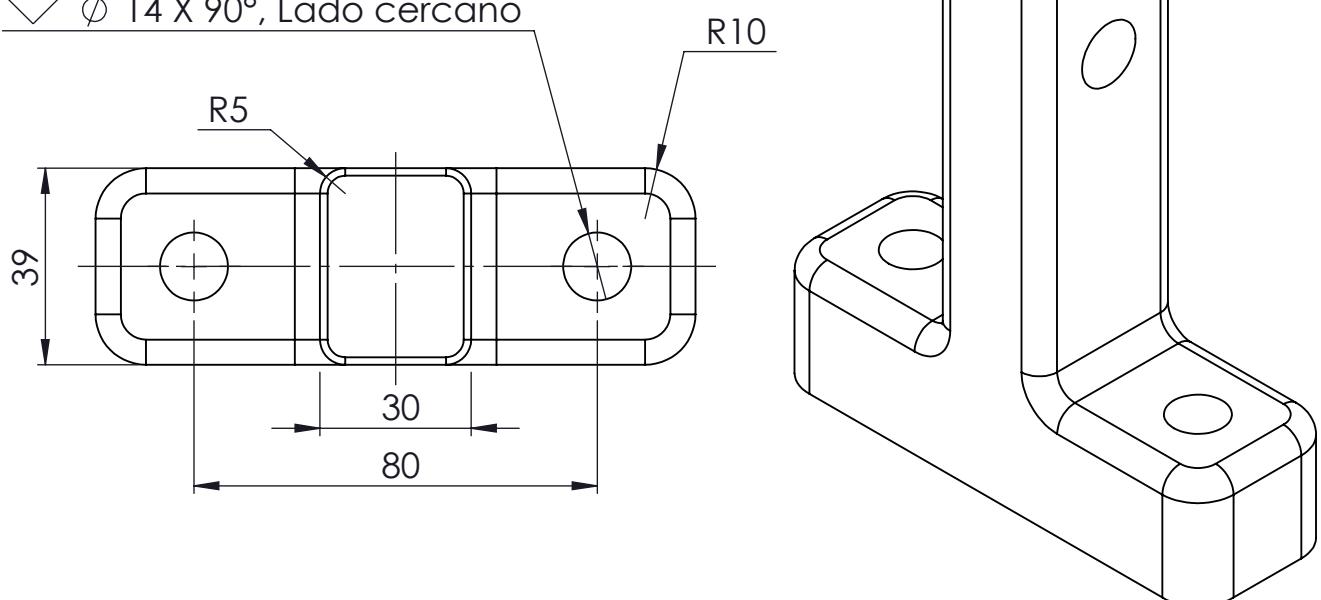
INGENIERO	PROYECTO	
Sergio Moldes Álvarez	Diseño y cálculo estructural de un dispositivo para el tratamiento de epilepsia mediante imanes	
REFERENCIA	PETICIONARIO: E.E.I. Universidad de Vigo	
CASCO FINAL	SITUACIÓN: As Lagoas, Marcosende, 36310 Vigo, Pontevedra	
FECHA	PLANO	ESCALA
28/08/2023	CILINDRO POSICIONADOR D70	1:1
		Nº DE PLANO
		1004



INGENIERO	PROYECTO
Sergio Moldes Álvarez	Diseño y cálculo estructural de un dispositivo para el tratamiento de epilepsia mediante imanes
REFERENCIA	PETICIONARIO: E.E.I. Universidad de Vigo
CASCO FINAL	SITUACIÓN: As Lagoas, Marcosende, 36310 Vigo, Pontevedra
FECHA	PLANO
28/08/2023	CASQUILLO ROSCADO D70
Nº DE PLANO	1:1
	Universidade de Vigo
	1005



$2 \times \emptyset 14$ POR TODO
 $\emptyset 14 \times 90^\circ$, Lado cercano



INGENIERO

Sergio Moldes Álvarez

REFERENCIA

CASCO FINAL

FECHA

28/08/2023

PROYECTO

Diseño y cálculo estructural de un dispositivo para el tratamiento de epilepsia mediante imanes

PETICIONARIO: E.E.I. Universidad de Vigo

SITUACIÓN: Ubicación del proyecto
Población. Provincia

PLANO

SOPORTE CASCO

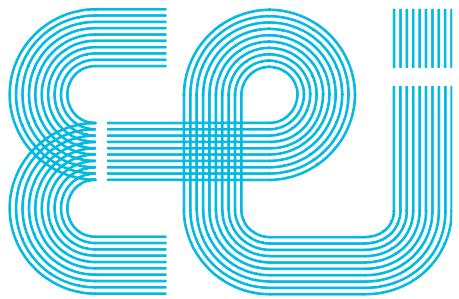


ESCALA

1:1.5

Nº DE PLANO

1006



Escuela de Ingeniería Industrial

TRABAJO FIN DE MASTER

Diseño y cálculo estructural de un dispositivo para el tratamiento de epilepsia mediante imanes.

Máster Universitario en Ingeniería en Industrial

Documento

PRESUPUESTO

Universida_de Vigo

CONTENIDO

Contenido	0
1 Costes de diseño.....	1
1.1 Costes de mano de obra.....	1
1.2 Costes de equipos empleados y software	1
1.3 Costes totales de diseño	1
2 Costes de materiales y fabricación.....	2
3 Presupuesto total de ejecución	3

1 COSTES DE DISEÑO

1.1 Costes de mano de obra

Tabla 1: Costes de mano de obra

Concepto	Tiempo (h)	Coste(€/h) *	Total (€)
Análisis de alternativas	20	15	300.00
Diseño del proyecto	100	15	1500.00
Optimización de diseño	150	15	2250.00
Simulaciones	50	15	750.00
Realización de planos	5	15	75.00
Redacción de documentos técnicos	40	15	600.00
Subtotal			5475.00

*El coste de la hora se supone para una persona en formación.

1.2 Costes de equipos empleados y software

En la tabla a continuación se engloban los costes por hardware y software usado.

Tabla 2: Costes de equipos y software

Concepto	Meses	Coste (€/año)	Total (€)
SolidWorks 2023	4	8100.00	2700.00
Catia V5	3	4500.00	1125.00
Altair Hypermesh	1.5	2000.00	250.00
Design Space	0.5	5000.00	208.33
ANSYS	Mechanical	1	22000.00
	Mechanical CFD-Flo	0.5	29000.00
Subtotal			7325.00

1.3 Costes totales de diseño

Tabla 3: Costes totales de diseño

Concepto	Total (€)
Costes de mano de obra	5475.00
Costes de equipos empleados y software	7325.00
Subtotal	12800.00

2 COSTES DE MATERIALES Y FABRICACIÓN

En este apartado se muestran los costes de los elementos comerciales y los de fabricación. En estos últimos se adjunta el precio total de cada unidad, teniendo en cuenta el coste de los materiales y los procesos llevados a cabo (mecanizado, fresado, pintado...), debido a que el presupuesto se obtiene a través de una empresa manufacturera local y el precio engloba todos los diferentes procesos, sin detallar el coste de cada uno por separado.

Tabla 4: Costes de elementos comerciales

Concepto	Unidades	Precio unitario (€/ud)	Total (€)
Grúa hidráulica para minusválidos	1	535.00	535.00
Imán D70-45	5	135.30	676.50
Imán D50-40	5	59.30	296.50
Tornillo DIN 912 titanio	2	11.50	23.00
Tuerca DIN 985 titanio	2	7.10	14.20
Arandela DIN 125 titanio	2	2.95	5.90
Total			1551.10

Tabla 5: Coste de fabricación

Concepto	Unidades	Precio unitario (€/ud)	Total (€)
Casco	1	2900.00	2900.00
Soporte	1	350.00	350.00
Conjunto de posicionadores D50*	5	48.33	241.66
Conjunto de posicionadores D70*	5	58.55	292.75
Total			3784.41

***Tabla 6: Conjunto de posicionadores D50**

	Unidades	Precio unitario	Total (€)
Consumo PA12	0.250 kg/ud	157.30 €/kg	39.33
Coste impresión	1 día/ud	9.00 €/día	9.00
Total			48.33

***Tabla 7: Conjunto de posicionadores D70**

	Unidades	Precio unitario	Total (€)
Consumo PA12	0.315 kg/ud	157.30 €/kg	49.55
Coste impresión	1 día/ud	9.00 €/día	9.00
Total			58.55

3 PRESUPUESTO TOTAL DE EJECUCIÓN

En este apartado se suman los costes de ingeniería y los costes de fabricación obteniendo el presupuesto total.

Tabla 8: Costes totales de estructura completa

Concepto	Total (€)
Costes de ingeniería	12800.00
Coste de elementos comerciales	1551.10
Coste de fabricación	3784.33
Total	18135.43