



Universidad
de La Laguna

Escuela Superior de
Ingeniería y Tecnología
Sección de Ingeniería Industrial



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
SECCIÓN DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Proyecto Final de Grado

**DISEÑO DEL PROTOTIPO DEL INSTRUMENTO CRIOGÉNICO MFIS
(MULTY FREQUENCY INSTRUMENT SOUTH) DEL EXPERIMENTO
QUIJOTE**

Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica

Alumno: Adrián Lorenzo Rodríguez

Tutores: Afrodisio Vega Moreno

Viana Lida Guadalupe Suarez

Julio, 2016

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y
TECNOLOGÍA**
GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Índice General

PROYECTO FINAL DE GRADO

TÍTULO

DISEÑO DEL PROTOTIPO DEL INSTRUMENTO CRIOGÉNICO MFIS
(MULTY FREQUENCY INSTRUMENT SOUTH) DEL EXPERIMENTO
QUIJOTE

AUTOR

Adrián Lorenzo Rodríguez

Índice Memoria

1. Resumen/Abstract	5
2. Objeto	6
3. Alcance	6
4. Antecedentes	6
5. Localización	9
6. Normas y referencias	9
6.1 Disposiciones legales y normas aplicables	9
6.2 Bibliografía	9
6.3 Programas	10
7. Requisitos de diseño	10
8. Evolución del diseño	11
9. Descripción general del instrumento	13
9.1 Optomecánica	15
9.2 Criostato	16
9.2.1 Estructura fría	16
9.2.1.1 Estructura fría del receptor	16
9.2.1.2 Estructura fría del criostato	17
9.2.2 Shields	20
9.2.3 Estructura de vacío	21
10. Criogenia	22
10.1 Justificación	22
10.2 Elemento comercial	23
11. Vacío	24
12. Conexión de los elementos comerciales	26
12.1 Cabeza fría	26
12.2 Sistema de vacío	27
13. Alternativas	28

14. Conclusiones	29
15. Orden de prioridad entre los documentos básicos	30

Índice Anexo I. Cálculos térmicos

1. Introducción.....	4
2. Hipótesis.....	4
2.1. Transferencia de calor por conducción	4
2.2. Transferencia de calor por radiación	5
3. Materiales.....	6
3.1. Cobre OFHC.....	6
3.2. G10.....	7
3.3. Aluminio 6082 T6	7
4. Cálculos analíticos	7
4.1. Conducción	7
4.1.1. Conducción entre la tapa de vacío del receptor y el plato de la OMT.....	8
4.1.2. Conducción entre el plato frío de 20 K y el plato frío de 50 K.....	9
4.1.3. Conducción entre el plato frío de 50 K y la tapa de vacío	10
4.2. Radiación	10
4.2.1. Sección FAT	11
4.2.2. Sección SLIM.....	13
4.2.3. Sección CONE	14
4.2.4. Tapas y ventana.....	16
4.2.4.1. Tapa trasera de vacío.....	16
4.2.4.2. Tapa media de vacío.....	16
4.2.4.3. Ventana frontal de mylar.....	17
5. Cálculos computacionales.....	18
5.1. Conducción	18
5.1.1. Conducción entre la tapa de vacío del receptor y el plato de la OMT.....	18
5.1.2. Conducción entre el plato frío de 20 K y el plato frío de 50 K.....	19
5.1.3. Conducción entre el plato frío de 50 K y la tapa de vacío	19
5.2. Radiación	20
5.2.1. Sección FAT	20

4.2.2.	Sección SLIM.....	13
4.2.3.	Sección CONE	14
4.2.4.	Tapas y ventana.....	16
4.2.4.1.	Tapa trasera de vacío.....	16
4.2.4.2.	Tapa media de vacío.....	16
4.2.4.3.	Ventana frontal de mylar.....	17
5.	Cálculos computacionales.....	18
5.1.	Conducción	18
5.1.1.	Conducción entre la tapa de vacío del receptor y el plato de la OMT.....	18
5.1.2.	Conducción entre el plato frío de 20 K y el plato frío de 50 K.....	19
5.1.3.	Conducción entre el plato frío de 50 K y la tapa de vacío	19
5.2.	Radiación	20
5.2.1.	Sección FAT	20
5.2.2.	Sección SLIM.....	22
5.2.3.	Sección CONE	23
5.2.4.	Tapas y ventana.....	24
5.2.4.1.	Tapa trasera de vacío.....	24
5.2.4.2.	Tapa media de vacío.....	25
5.2.4.3.	Ventana frontal de mylar.....	26
6.	Conclusiones	26
6.1.	Potencia térmica total a extraer	26
6.2.	Comparación de los valores analíticos frente a los computacionales	27

Índice Anexo II. Estudio de vacío

1.	Introducción.....	3
2.	Hipótesis de carga	3
3.	Materiales.....	4
4.	Cálculos computacionales de las secciones.....	5
4.1.	Tensiones y deformaciones	5
4.1.1.	Sección FRONT.....	6
4.1.2.	Sección ECCEN.....	7
4.1.3.	Sección BACK	7

4.1.4.	Sección CONE	8
4.1.5.	Sección SLIM.....	8
4.1.6.	Sección FAT	9
5.	Cálculos analíticos de las secciones	9
5.1.	Hipótesis consideradas	9
5.2.	Resultados obtenidos.....	11
5.2.1.	Sección CONE	11
5.2.2.	Sección SLIM.....	12
5.2.3.	Sección FAT	13
6.	Estudio con variación de los espesores	14
7.	Estudio de pandeo	17
8.	Conclusiones	19

Índice Anexo III. Árbol de producto y planos

1.	Introducción.....	4
2.	Árbol de producto	5
3.	Planos	6
3.1.	Criostato.....	6
3.2.	Sección criostato	7
3.3.	Varilla 20x399	8
3.4.	Varilla 20x390	9
3.5.	Tapa vacío receptor.....	10
3.6.	Tapa vacío frontal	11
3.7.	Tapa vacío 2	12
3.8.	Tapa vacío	13
3.9.	Sección shields	14
3.10.	Shield 50 K rectángulo	15
3.11.	Shield 50 K cono	16
3.12.	Shield 50 K cilindro	17
3.13.	Shield 20 K cono	18
3.14.	Shield 20 K cilindro.....	19

3.15.	Pletina 30x350	20
3.16.	Pletina 30x90	21
3.17.	Pieza unión pletina	22
3.18.	Envoltura vacío 2	23
3.19.	Envoltura vacío 2 cono	24
3.20.	Envoltura vacío 2 cilindro	25
3.21.	Envoltura vacío 1	26
3.22.	Cold plate 50 K	27
3.23.	Cold plate 20 K	28
3.24.	Base fría bocina 2	29
3.25.	Base fría bocina 1	30
3.26.	Aro vacío 4	31
3.27.	Aro vacío 3	32
3.28.	Aro vacío 2	33
3.29.	Aro vacío 1	34
3.30.	Aro tapa shield 50 K	35
3.31.	Aro tapa shield 20 K	36
3.32.	Aro base shield 50 K	37
3.33.	Aro base shield 20 K	38

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Memoria

PROYECTO FINAL DE GRADO

TÍTULO

**DISEÑO DEL PROTOTIPO DEL INSTRUMENTO CRIOGÉNICO MFIS
(MULTY FREQUENCY INSTRUMENT SOUTH) DEL EXPERIMENTO
QUIJOTE**

AUTOR

Adrián Lorenzo Rodríguez

HOJA DE IDENTIFICACIÓN

Datos del Ingeniero

Nombre del Ingeniero: Adrián Lorenzo Rodríguez

Dirección: C/ Zagua nº 18, Arona. S/C de Tenerife

Teléfono: 671 326 378

E-mail: alorenzorodriguez1994@hotmail.com

Datos del Cliente

Cliente: IAC (Instituto de Astrofísica de Canarias)

Dirección: C/ Vía Láctea s/n, 38205 San Cristóbal de La Laguna, S/C de Tenerife

Teléfono: 922 605 200

Web: www.iac.es

FIRMADO

Adrián Lorenzo Rodríguez

Índice Memoria

1. Resumen/Abstract	5
2. Objeto	6
3. Alcance	6
4. Antecedentes	6
5. Localización	9
6. Normas y referencias	9
6.1 Disposiciones legales y normas aplicables	9
6.2 Bibliografía	9
6.3 Programas	10
7. Requisitos de diseño	10
8. Evolución del diseño	11
9. Descripción general del instrumento	13
9.1 Optomecánica	15
9.2 Criostato	16
9.2.1 Estructura fría	16
9.2.1.1 Estructura fría del receptor	16
9.2.1.2 Estructura fría del criostato	17
9.2.2 Shields	20
9.2.3 Estructura de vacío	21
10. Criogenia	22
10.1 Justificación	22
10.2 Elemento comercial	23
11. Vacío	24
12. Conexión de los elementos comerciales	26
12.1 Cabeza fría	26
12.2 Sistema de vacío	27
13. Alternativas	28

14. Conclusiones	29
15. Orden de prioridad entre los documentos básicos	30

1. Resumen/Abstract

El Experimento QUIJOTE (Q-U-I JOint Tenerife) CMB está operando en el Observatorio del Teide con el objetivo de caracterizar la polarización del FCM y otros procesos de emisión Galácticos y extragalácticos en el rango de frecuencias de 10–40GHz y a escalas angulares grandes y medianas. El experimento consiste en dos telescopios instalados dentro de un recinto simple, y tres instrumentos, el MFI (multi-frecuencia 10-30GHz), el TGI (26-36GHz) y el FGI (37-47GHz). QUIJOTE es el único experimento en Europa que cubre el rango de frecuencia de 10-20GHz. Por lo tanto, sería extremadamente importante explorar la posibilidad de ampliar el proyecto QUIJOTE al Hemisferio Sur, de tal manera que se pueda lograr la cobertura completa del cielo en la banda 10-20GHz.

El objetivo del presente proyecto es diseñar y analizar un primer prototipo de un píxel del MFI para la antena NEC de 7.6m, que servirá como banco de pruebas para un futuro estudio desde Sudáfrica a que estas frecuencias.

El instrumento consta de un receptor de microondas en la banda de frecuencias 10-20GHz que, debido a las especificaciones para un funcionamiento correcto, debe instalarse en un criostato. Basado en el diseño del receptor del MFI, este documento aporta el diseño preliminar del criostato correspondiente, junto con una serie de estudios térmicos y mecánicos que lo justifican.

The QUIJOTE (Q-U-I JOint Tenerife) CMB Experiment is operating at the Teide Observatory with the aim of characterizing the polarization of the CMB and other processes of Galactic and extragalactic emission in the frequency range of 10–40GHz and at large and medium angular scales. The QUIJOTE CMB experiment consists of two telescopes installed inside a single enclosure, and three instruments, the MFI (multi-frequency 10–30GHz), the TGI (26-36GHz) and the FGI (37-47GHz). QUIJOTE is the only experiment in Europe covering the frequency range of 10-20GHz. Therefore, it would be extremely important to explore the possibility of extending the QUIJOTE project to the South Hemisphere, in such a way that full sky coverage in the bands 10-20GHz can be achieved.

The aim of the present project is to design and analyze a first prototype of a MFI pixel for the 7.6m NEC antenna, which will serve as a test bench for a future survey from South Africa at these frequencies.

The instrument consists of a microwave receiver in the 10-20GHz frequency band which, due to the specifications for proper operation, must be installed in a cryostat. Based on the design of the MFI receiver, this document brings the preliminary design of the corresponding cryostat, together with a series of thermal and mechanical surveys to justify it.

2. Objeto

El objeto del proyecto, el cual le otorga nombre al mismo, es el diseño y análisis de un prototipo del instrumento criogénico MFIS (Multy Frequency Instrument South) perteneciente al experimento QUIJOTE. Consiste en un receptor de ondas infrarrojas que, por los requerimientos de funcionamiento, ha de ir instalado en un criostato. Se elaborarán los diseños conceptuales, así como una serie de estudios para comprobar la funcionalidad del instrumento en base a los diseños.

3. Alcance

El presente proyecto abarca los siguientes aspectos:

- Diseño y análisis termo-mecánico del criostato del instrumento.
 - o Diseño conceptual.
 - o Análisis analítico de las pérdidas térmicas por conducción y radiación complementado por un análisis computacional por el método de los elementos finitos.
 - o Análisis analítico de los esfuerzos y deformaciones complementado por un análisis computacional por el método de los elementos finitos.
- Generación de los planos de fabricación.

4. Antecedentes

Como ya se mencionó con anterioridad, este proyecto deriva del experimento QUIJOTE, una colaboración científica entre el IAC, el Instituto de Física de Cantabria,

el Departamento de Ingeniería de Comunicaciones de Santander, el Observatorio Jodrell Bank de Manchester, el Cavendish Laboratory de Cambridge y la compañía IDOM. Consiste en dos telescopios y tres instrumentos dedicados a la medida de la polarización del cielo en microondas, en el rango de frecuencias comprendido entre 11 GHz y 42 GHz, y en escalas angulares de 1 grado.

Este experimento tiene como objetivo caracterizar la polarización del Fondo Cósmico de Microondas (FCM) y otros procesos de emisión galáctica y extra-galáctica.

Los telescopios constan de un espejo primario parabólico de 2,25 m de diámetro y un espejo secundario hiperbólico de 1,89 m de diámetro. Cada telescopio va instalado en su propia plataforma, la cual confiere al telescopio movimiento rotacional completo en el eje vertical y un giro convenientemente limitado en el eje horizontal. Las diferencias principales entre ambos telescopios son debidas a mejoras por el avance tecnológico. El segundo telescopio, adquirido con posterioridad al primero, posee mejores soluciones ante los requisitos de sujeción y estabilidad, así como sistemas más precisos para el accionamiento y control del movimiento del telescopio.



Figura 1. Telescopio Quijote 1 (Fuente pública)

El primer instrumento de QUIJOTE, el MFI (Multy Frequency Instrument), posee cinco bocinas, dos con receptores en la frecuencia de 11-13 GHz, dos con receptores en la frecuencia de 17-19 GHz y una última bocina con receptor en la frecuencia de 30 GHz.

La característica a resaltar del instrumento es que el criostato solo alberga los componentes electrónicos del instrumento, mientras que la parte opto-mecánica queda en el ambiente.

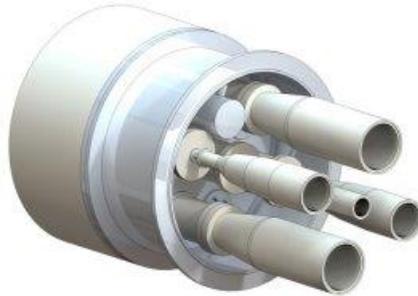


Figura 2. Instrumento MFI (Fuente pública)

El segundo instrumento de QUIJOTE, el TGI (Thirty-GHz Instrument) constará de 31 polarímetros trabajando en el rango de frecuencia de 26-36 GHz. En este caso, tanto la opto-mecánica como la electrónica se encuentran dentro del criostato.

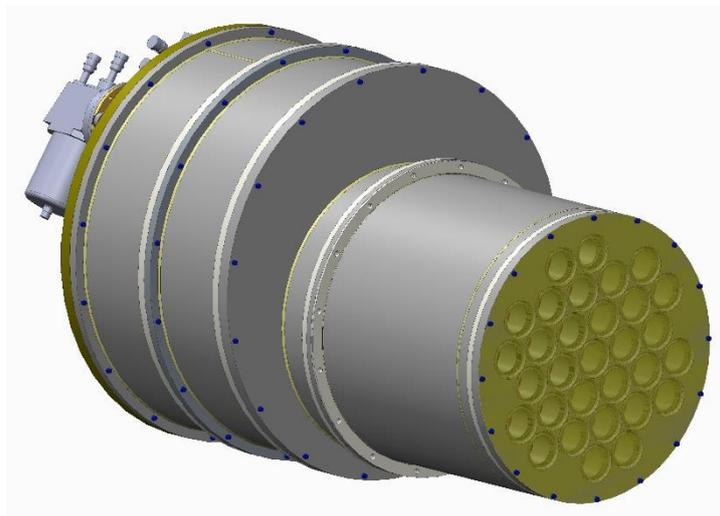


Figura 3. Instrumento TGI (Fuente pública)

El MFIS se podría definir como una fusión entre el MFI y el TGI. Partiendo del modelo de receptor tipo bocina del MFI, pero con la estructura de criostato del TGI, en la que el receptor completo queda dentro del mismo.

5. Localización

El instrumento MFIS se diseñará y fabricará para ser instalado en la antena NEC de 7,6 m, propiedad de la universidad de Wits, en Johannesburgo (Sudáfrica).



Figura 4. Ubicación antena NEC



Figura 5. Antena NEC

6. Normas y referencias

6.1 Disposiciones legales y normas aplicables

UNE 1 120 96/ Dibujos técnicos. Tolerancias de cotas lineales y angulares.

UNE 1027/ Dibujos técnicos. Plegado de planos.

UNE 1039/ Dibujos técnicos. Acotaciones. Principios generales, definiciones, método de ejecución e indicaciones especiales.

6.2 Bibliografía

En este apartado se indica la serie de referencias bibliográficas a las que se ha accedido para el correcto desarrollo y justificación del proyecto:

- WILLIAM D. ROGATTO. The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook. Volume 3. Electro-Optical Components.
- JEAN LOUIS LIZON. Cryo-Vacuum Training. Part1. Vacuum. Part 2. Cryogenics.
- V.I. Feodosiev. Resistencia de Materiales. Ed. MIR. Moscú

También se ha hecho uso de las siguientes páginas web:

- <http://www.iac.es/proyecto/cmb/pages/en/home-cmb.php>
- <https://lopezva.files.wordpress.com/2011/10/cap19.pdf>
- www.wikipedia.org

6.3 Programas

La elaboración de este proyecto se ha apoyado en el uso de los siguientes programas:

- Diseño mecánico de las piezas y conjuntos:
 - o PTC Creo Parametric 2.0
 - o Solid Works 2016
- Cálculos térmicos y estructurales:
 - o Ansys Workbench 15.0
- Cálculos analíticos:
 - o PTC Mathcad Prime 3.1
 - o Microsoft Office Excel 2016
- Generación y edición de planos de fabricación:
 - o Auto CAD 2015
 - o Solid Works 2016

7. Requisitos de diseño

- El criostato debe tener una envolvente de diseño cilíndrica.
- El diámetro máximo no debe superar los 700 mm.
- La longitud máxima no debe superar los 1700 mm.
- La carcasa exterior debe soportar una diferencia de presión de 1,5 atm.
- Tanto la opto-mecánica como la electrónica deben mantenerse a una temperatura inferior de los 25 K.
- El peso máximo del instrumento no debe superar los 250 kg.
- El receptor ha de ser extraíble sin necesidad de desmontar el criostato para labores de mantenimiento o sustitución (diseño modular).

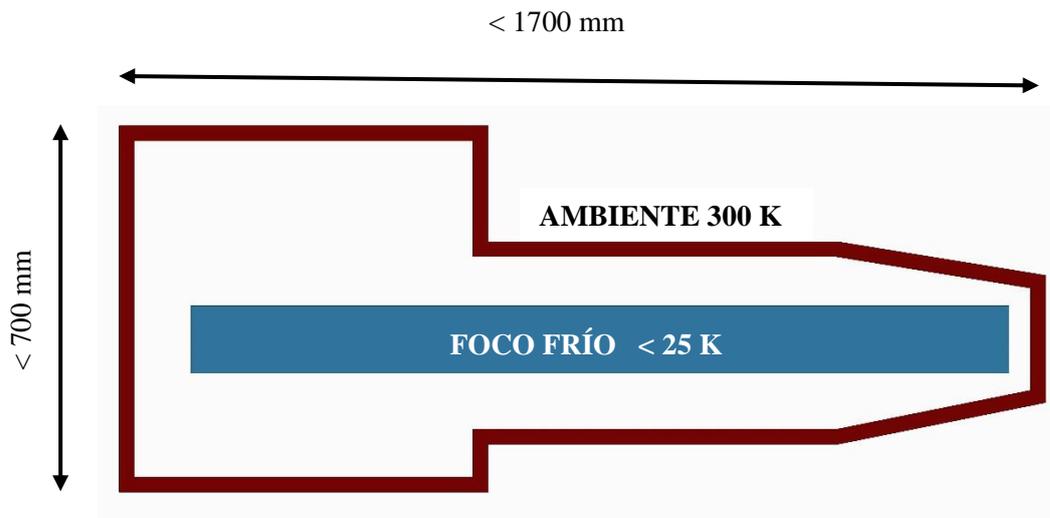


Figura 6. Esquema instrumento (Fuente propia)

8. Evolución del diseño

De forma general, el instrumento se divide en dos partes: el receptor y el criostato. El diseño y fabricación del receptor es ajeno al presente proyecto, este solo abarca el diseño del criostato. A grosso modo, el objetivo del proyecto es diseñar un criostato en el que introducir el receptor ya fabricado, respetando su funcionalidad y cumpliendo con los requisitos impuestos.

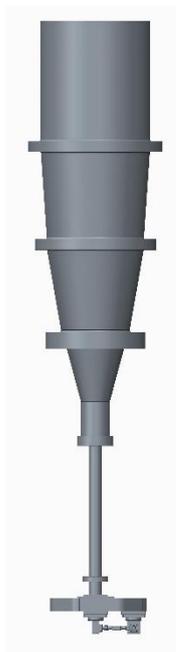


Figura 7. Receptor (Fuente propia)



Figura 8. Criostato (Fuente propia)

Sin entrar en mayor detalle, el diseño preliminar del criostato partió de la referencia de la envolvente del TGI, cumpliendo así el requisito de la envolvente cilíndrica. Tomando como guía las dimensiones del receptor, se elaboró un primer modelo básico y superficial:

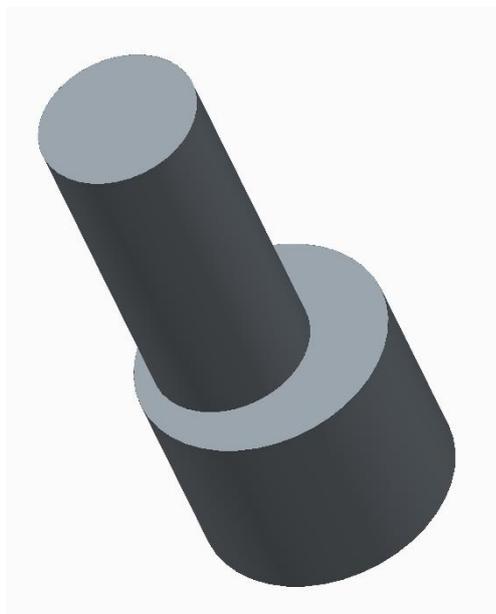


Figura 9. Criostato cilíndrico (Fuente propia)

A partir de esta envolvente, se pasó a diseñar todos los componentes internos del criostato, necesarios tanto para sujetar el receptor como para realizar el acople térmico. El diseño de todos estos componentes se desarrolló a partir del modelo 3D del receptor, se diseñó directamente sobre él. Por ello, sin tener en cuenta la envolvente, la evolución del diseño del criostato fue de dentro hacia fuera.

Una vez se diseñó la estructura interna, aprovechando la situación de tener un solo receptor y, con el objetivo de reducir al máximo espacio y peso, se tomó la decisión de acabar la parte superior del receptor en forma de cono, eliminando espacio innecesario:

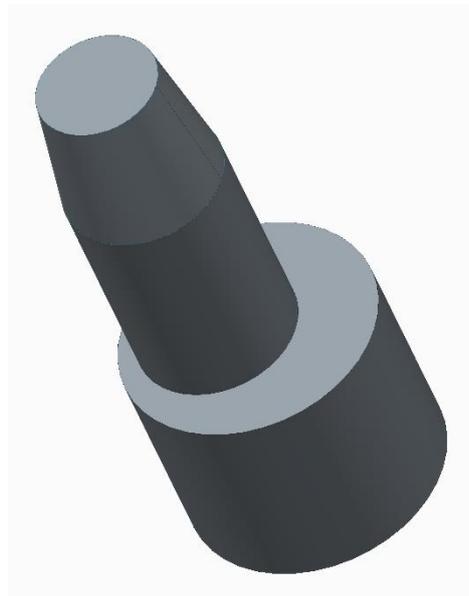


Figura 10. Criostato cónico (Fuente propia)

Aunque con la referencia de los instrumentos previos ya mencionados, todos los componentes que conforman el criostato se han desarrollado en exclusiva y de elaboración propia para el presente proyecto.

9. Descripción general del instrumento

Un criostato es un dispositivo diseñado para mantener un entorno o un objeto a muy bajas temperaturas. Se consideran temperaturas criogénicas las temperaturas inferiores a 123 K.

Desde una perspectiva global, un instrumento criogénico debe cumplir una serie de requerimientos para su correcto funcionamiento:

- Mantener el foco frío a una temperatura adecuada. Esto se consigue mediante una máquina térmica que, aplicando un determinado ciclo termodinámico a un fluido criogénico, proporcione un intercambio de calor adecuado.
- Un aislamiento térmico apropiado del entorno caliente. Son frecuentes diferencias de temperaturas de varios cientos de grados entre el foco frío y los alrededores, dando lugar a flujos de calor radiativos y conductivos no admisibles para el sistema.
- Una conexión térmica adecuada entre los componentes del instrumento a enfriar y el foco frío. Los elementos ópticos deben mantenerse a unas temperaturas estables dentro de unos límites de oscilación, así como de unos límites de uniformidad de estas temperaturas.
- Integridad mecánica del sistema. Los componentes enfriados deben ser posicionados con precisión y soportados de una manera firme. Desde el punto de vista mecánico, la estructura soporte debe ser lo más maciza posible de cara a proporcionar la máxima rigidez. Por el contrario, desde el punto de vista térmico, la estructura soporte ha de ser ligera para minimizar la inercia térmica. Es necesario encontrar el equilibrio entre ambas sollicitaciones, junto con las limitaciones de peso pertinentes.

A continuación, se presenta una imagen del instrumento en su conjunto, diferencia por colores los diferentes subconjuntos que lo componen:

Leyenda de colores:

- Amarillo: Receptor
- Rojo: Estructura fría del receptor
- Verde: Estructura fría del criostato
- Azul: Shields
- Marrón: Estructura de vacío

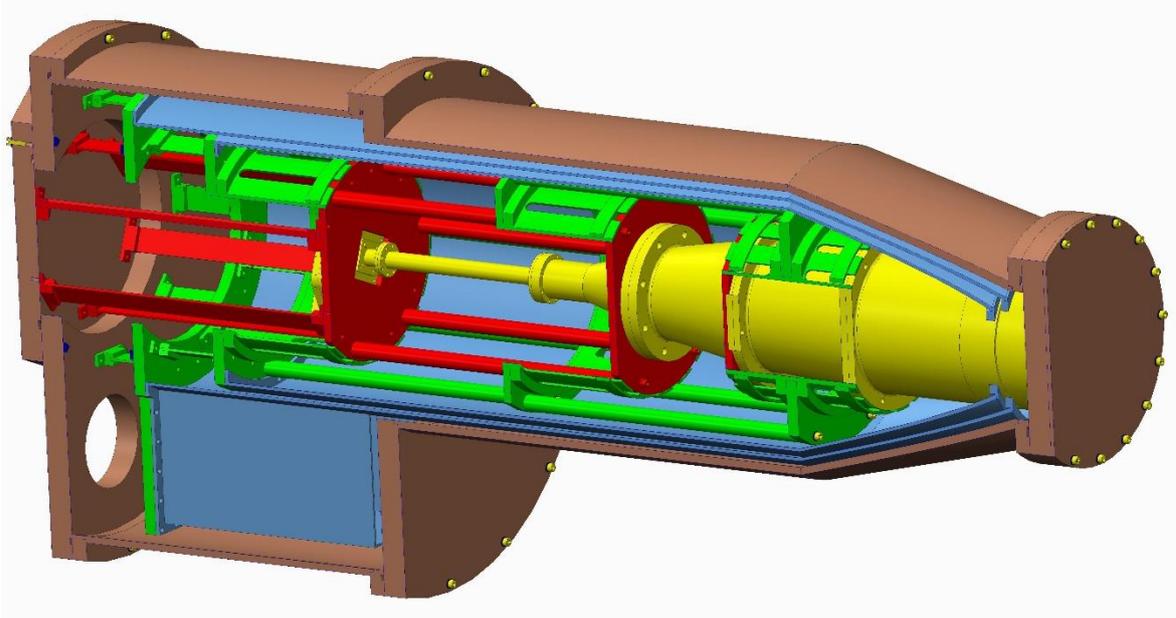


Figura 11. Instrumento por colores (Fuente propia)

9.1 Optomecánica

El receptor del instrumento es un polarímetro, también conocido como receptor de microondas, que trabaja en banda de frecuencias de 10-20 GHz. Este está compuesto por cuatro partes principales:

- La bocina.
- El polarizador.
- La OMT (Transductor Ortomodo).
- Los LNA's (Amplificadores criogénicos)

El desarrollo, diseño y fabricación de este dispositivo fue tarea del Grupo RF y de la sección de Microondas del Departamento de Ingeniería de Comunicaciones (DICOM) de la Universidad de Cantabria.

A continuación, se muestran los modelos 3D que se me proporcionaron como referencia para el diseño del criostato:

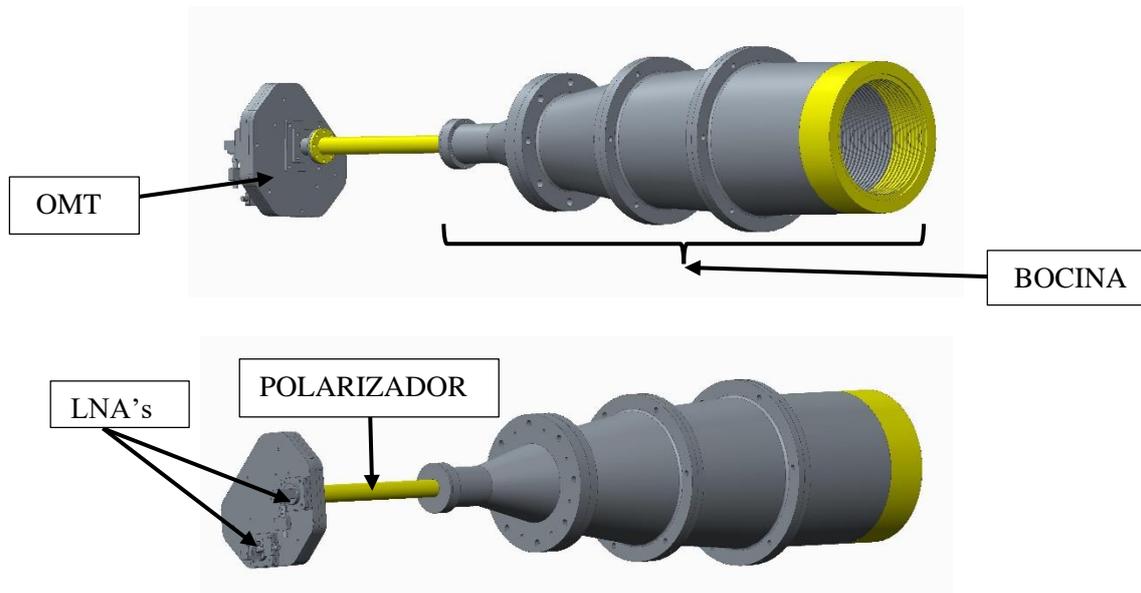


Figura 12. Vistas del receptor (Fuente propia)

9.2 Criostato

El criostato en sí abarca todos aquellos elementos encargados de mantener el receptor del instrumento a una temperatura inferior a los 25 K. Debido a la cantidad y diversidad de componentes que intervienen en esta labor, se irán exponiendo por medio de subgrupos pertenecientes a los dos grupos principales: estructura fría y estructura de vacío.

9.2.1 Estructura fría

Debido a la modularidad del sistema y al requisito de una fácil extracción del receptor sin necesidad del desarme del criostato, ha sido necesario dividir la estructura fría en dos subgrupos: estructura fría del receptor y estructura fría del criostato. Ambas quedan acopladas entre sí en la situación de montaje normal.

9.2.1.1 Estructura fría del receptor

Esta estructura es la encargada de mantener el contacto térmico entre el criostato y el receptor. No era posible realizar un acople directo al receptor sin impedir la extracción del mismo con cierta facilidad ya que, debido a su longitud, es necesario localizar varios puntos de contacto térmico para mantener los requerimientos de temperatura.

Para solucionar dicho problema, se ha optado por diseñar una serie de platos de cobre que irán anclados al receptor y unidos entre sí por barras cilíndricas del mismo material. Las barras no sólo aportan contacto térmico entre los platos sino que también confiere al receptor cierta rigidez en la zona más crítica. Como complemento al aumento de contacto térmico, se ha diseñado una pequeña pieza que conecta los LNA's directamente al plato de cobre, ya que mantener la temperatura de los mismos es importante.

Para la dimensión de los platos se ha tomado el mayor diámetro del receptor, manteniendo así un cilindro de diámetro constante para su extracción.

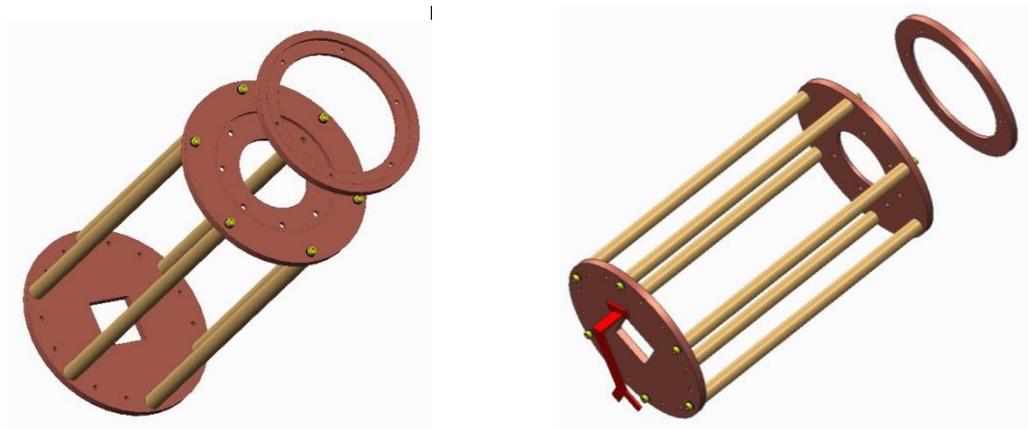


Figura 13. Estructura fría receptor (Fuente propia)



Figura 14. Montaje estructura fría receptor (Fuente propia)

9.2.1.2 Estructura fría del criostato

Esta estructura es la encargada de mantener el contacto térmico entre la estructura fría del receptor y la cabeza fría (sistema de extracción de calor del sistema). Uno de los

puntos más críticos en lo que ha diseño se refiere se da en este punto. Es necesario diseñar un acople entre ambos sistemas, el cual no puede ser fijo, pero debe mantener el contacto térmico durante el funcionamiento.

Partiendo de una solución ya existente para este problema, con las correspondientes adaptaciones a este caso concreto, se ha utilizado lo que se conoce como pinzas térmicas. Su funcionamiento se basa en la diferencia de contracciones al enfriar dos materiales, en este caso el cobre y el teflón, con diferentes coeficientes de expansión térmica.

Como se puede observar en la Figura 11, partiendo de un cilindro de cobre, se mecanizan una serie de “pestañas” con una longitud mínima que permita la fácil flexión de las mismas. A estas pestañas se acopla un aro de teflón. Mientras que a temperatura ambiente la pinza mantiene la holgura de diseño establecida, al enfriarse, debido a las propiedades térmicas de ambos materiales, el teflón se contrae más que el cobre, provocando la flexión de las pestañas y por consiguiente la reducción de la holgura.

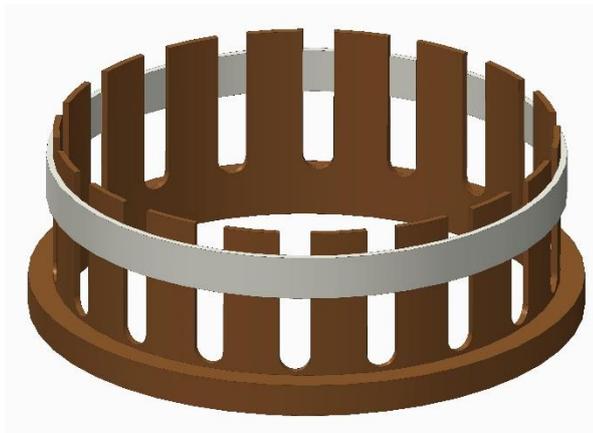


Figura 15. Pinza térmica (Fuente propia)

Con este sistema conseguimos que, a temperatura ambiente, se puede acoplar y desacoplar el receptor junto con su estructura sin ningún impedimento. Mientras que, a la temperatura de trabajo, se consigue el contacto térmico necesario entre la estructura fría del receptor y la estructura fría del criostato.

Para la estructura fría del criostato se ha utilizado un total de cuatro pinzas térmicas, siendo una de ellas doble por proximidad. También se ha utilizado el mismo

sistema de platos y barras de cobre descritos con anterioridad. En este caso, los platos establecen el enlace térmico con las pinzas así como, los denominados “platos fríos”, establecen el contacto térmico directo entre la cabeza fría y la estructura fría del criostato.

Hay dos platos fríos en relación a las dos etapas de las que dispone la cabeza fría:

- Plato frío de 20 K
- Plato frío de 50 K

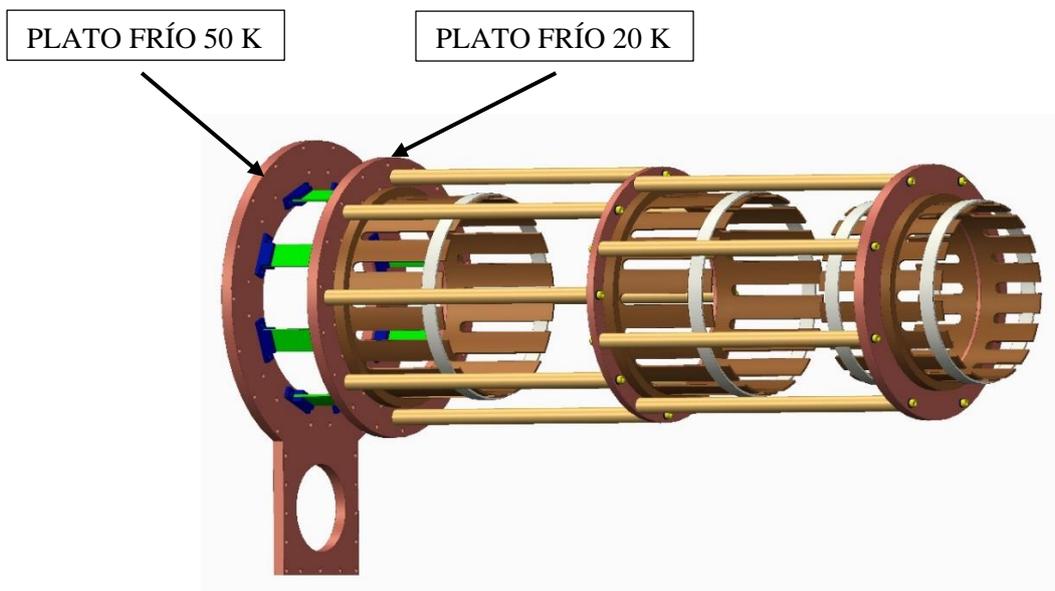


Figura 16. Estructura fría criostato (Fuente propia)

El plato frío de 20 K se une al plato frío de 50 K por medio de unas pletinas de G10. El uso de este material es debido a su bajo coeficiente de conductividad térmica frente a su alta resistencia mecánica. Se consigue una unión física entre ambos platos y un desacoplamiento térmico, evitando pérdidas de calor por conducción.

A continuación, se presenta una imagen del montaje de la estructura fría del criostato junto con la estructura fría del receptor y el propio receptor:

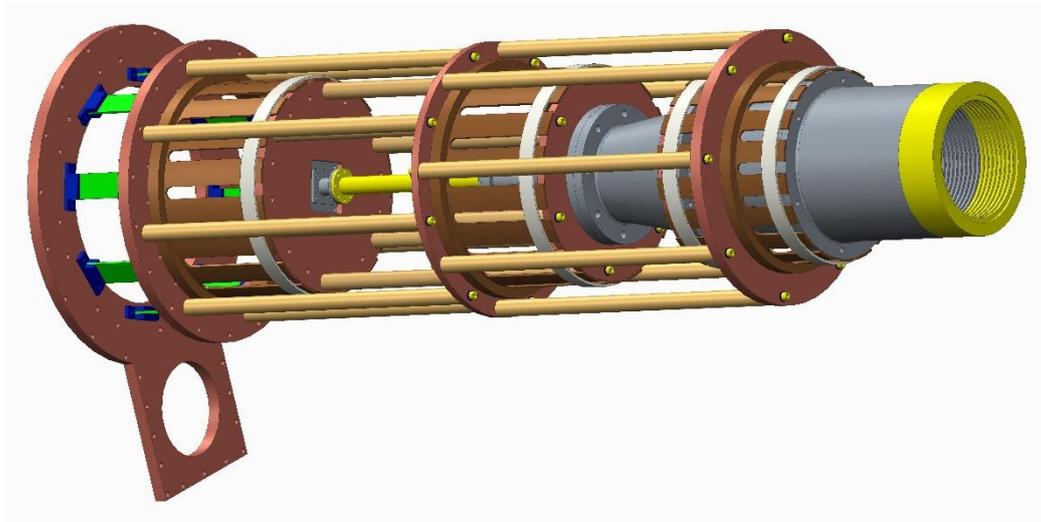


Figura 17. Conjunto estructura fría receptor y estructura fría criostato (Fuente propia)

9.2.2 Shields

Los shields son uno de los elementos más importantes dentro del diseño térmico del instrumento. Consiste en una carcasa formada por una lámina delgada de metal, que sirve como apantallamiento para reducir los efectos de la radiación ambiente.

Debido a la propia definición del calor transmitido por radiación, la temperatura juega un importante papel en dicho calor. Cuanto mayor sea este salto térmico, mucho mayor será la transferencia de calor. Por ello, se han diseñado dos shields, correspondientes a las dos etapas de la cabeza fría, para cumplir con dicho fin. Un shield de 50 K y un shield de 20 K.

Según la bibliografía consultada con respecto a este tema, está teórica y empíricamente demostrado que la utilización de los shields reducen hasta casi la mitad la transferencia de calor por radiación con respecto a no utilizarlos.

Como complemento a la funcionalidad de los shields, se colocarán unas “mantas térmicas” de mylar para reducir aún más los efectos de la radiación dentro del criostato.

Cada shield irá fijado en su correspondiente plato frío en relación a las temperaturas. A continuación, se muestran los modelos 3D de los shields y su correspondiente montaje.

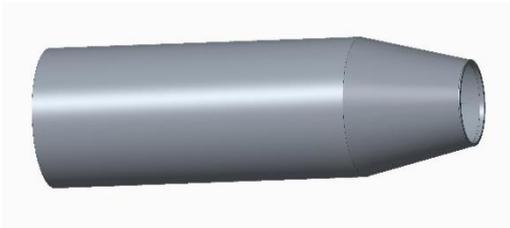


Figura 18. Shield 20 K (Fuente propia)

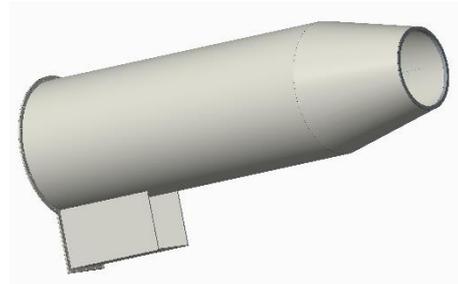


Figura 19. Shield 50 K (Fuente propia)

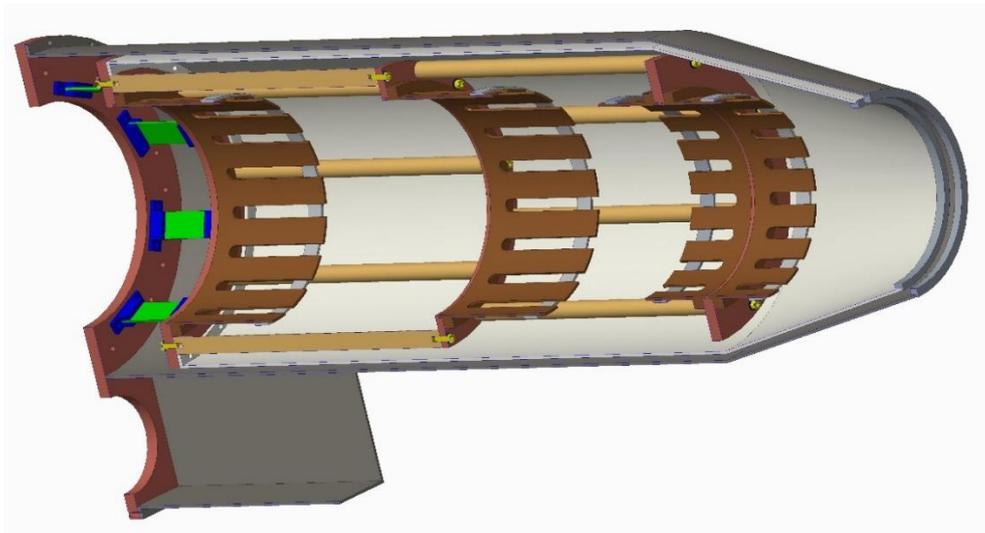


Figura 20. Sección montaje shields (Fuente propia)

9.2.3 Estructura de vacío

La estructura de vacío es la carcasa final del instrumento. Esta no solo permite mantener los valores de vacío deseados sino que también protege todos los componentes internos, tanto de los agentes ambientales como de los posibles daños por manipulación. Esta carcasa estará fabricada en aluminio. Consta de dos secciones cilíndricas y una sección cónica, de menor espesor con respecto a las tapas circulares.

En la parte frontal se ubica una ventana translúcida de mylar, con la finalidad de permitir la recepción de la señal infrarroja. En su parte posterior, con el objetivo de permitir la extracción del receptor, se sitúa una tapa hexagonal que conecta directamente con toda la estructura fría del receptor. De esta forma, desacoplando esta tapa de la tapa

circular posterior del criostato será posible extraer el receptor completo. La forma hexagonal facilita la orientación del receptor, ya que este no es simétrico en su totalidad.

Un aspecto importante dentro del diseño de la carcasa de vacío es la consideración de la utilización de juntas tóricas en cada una de las tapas. Este es un recurso indispensable para mantener la estanqueidad en el instrumento.

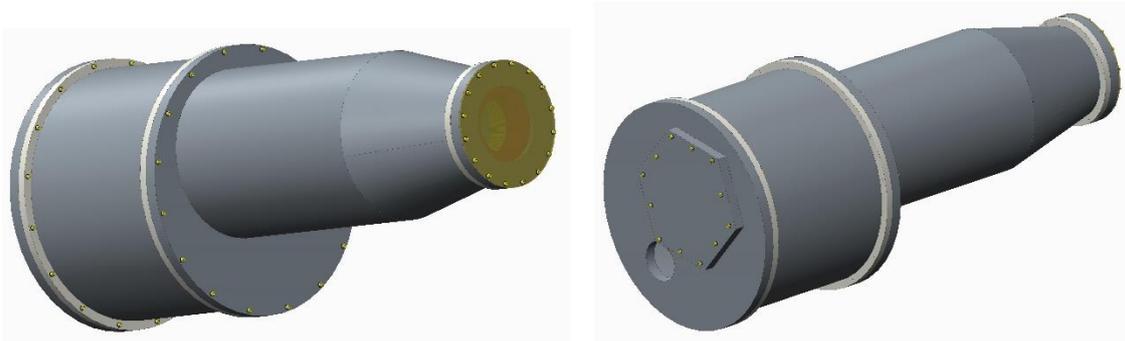


Figura 21. Vistas estructura vacío (Fuente propia)

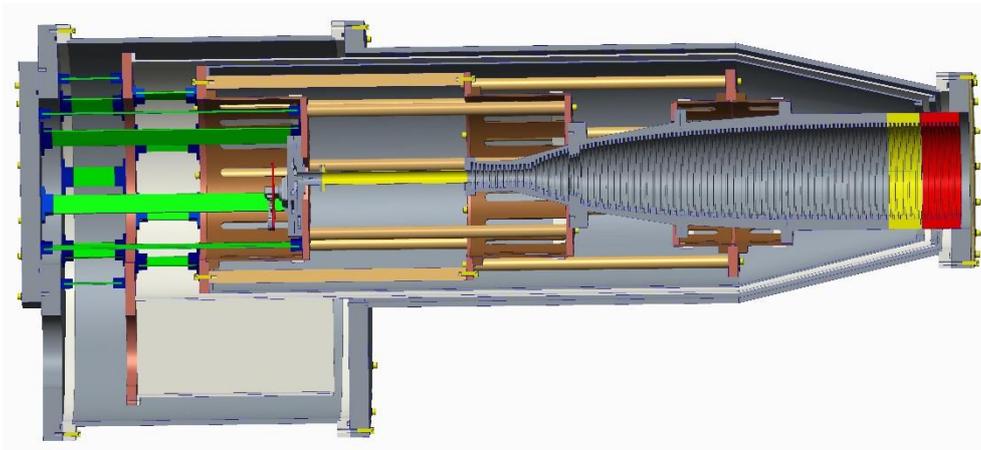


Figura 22. Sección estructura vacío (Fuente propia)

10. Criogenia

10.1 Justificación

En los receptores infrarrojos, mantener el receptor a temperaturas criogénicas es un requisito indispensable para su correcto funcionamiento. De forma natural, todo cuerpo con una temperatura superior a 0 K emite radiación infrarroja. Las señales celestes

que se pretenden captar con los instrumentos infrarrojos son de muy baja intensidad, la cual disminuye cuanto más lejano sea el foco de la señal.

Si el instrumento se dejara a una temperatura ambiente, la radiación infrarroja que emitiría por sí mismo impediría que el receptor captara ninguna otra señal por la gran diferencia de magnitud. El propio instrumento generaría una contaminación infrarroja. Por ello, el objetivo del sistema criogénico es reducir dicha contaminación a niveles despreciables, permitiendo así una correcta recepción de la señal deseada sin ningún tipo de interferencias.

10.2 Elemento comercial

Para mantener las temperaturas de criogenia se ha seleccionado un elemento comercial que cumple con las especificaciones deseadas. Se trata de un ciclo de refrigeración cerrado formado por un compresor de helio gas, una cabeza fría de dos etapas de refrigeración y los correspondientes conductos de transporte. Concretamente es el modelo 'Dual Stage Cold Head COOLPOWER 10 MD', del fabricante LEYBOL.

A continuación, se describe brevemente el funcionamiento de este dispositivo. El compresor proporciona helio gas a una presión de aproximadamente 20,4 atm y a temperatura ambiente a la cabeza fría a través de una de las conducciones. En la cabeza fría se expande, proporcionando trabajo contra un émbolo y pasando el helio a través de la primera y la segunda etapa. A una frecuencia de operación de 55 Hz, la primera etapa tiene una capacidad de enfriamiento de 80 K con una carga térmica de 110 W, mientras que la segunda etapa proporciona una temperatura de 20 K con una carga térmica de 18 W. Las temperaturas mínimas son 28 K y 18 K para la primera y segunda etapa respectivamente.

Cuando se completa el ciclo de expansión, el gas retorna por otro conducto de conexión al compresor a una presión aproximada de 6,7 atm, cerrando así el ciclo. El ciclo termodinámico que define este proceso se conoce como ciclo Gifford McMahon.



Figura 23. Cabeza fría (Fuente pública)

11. Vacío

11.1 Justificación

Para alcanzar y mantener las temperaturas criogénicas es necesario someter los componentes que van a ser enfriados a alto vacío (10^{-6} mbar), para de esta manera desacoplarlos térmicamente del ambiente a temperaturas mucho más elevadas eliminando así la transmisión por convección.

Además, parte de los gases que constituyen el aire son sólidos a temperatura ambiente, como el vapor de agua. Por tanto, hay que eliminarlos para evitar que se forme escarcha sobre la superficie interna del instrumento.

El conjunto de la cámara de vacío con el sistema de refrigeración criogénico es lo que se conoce en su conjunto como criostato.

11.2 Elemento comercial

El elemento principal que se utilizará para alcanzar niveles de alto vacío será la bomba turbomolecular. Sin embargo, este dispositivo, aunque alcanza niveles de vacío bastante elevados, no puede trabajar desde la presión ambiente. Esta bomba comenzará a

trabajar a partir de una presión aproximada de 0,1 mbar. Por este motivo, el ciclo de vacío deberá realizarse en dos etapas con dos bombas diferentes.

- 1ª Etapa: de 1 bar a 0,1 mbar → Bomba Scroll
- 2ª Etapa: de 0,1 mbar a 10^{-6} mbar → Bomba Turbomolecular

El proceso de vacío irá controlado por un sistema de automatización que se encargará tanto de controlar el ciclo como de realizar el cambio entre ambas bombas. Ambas bombas así como el sistema de control pertenecen al mismo fabricante que la cabeza fría, LEYBOLD. Concretamente los modelos de las bombas son:

- Bomba Scroll: Scrollvac SC 30D. Presión máxima 1×10^{-2} mbar.
- Bomba Turbomolecular: MAG W600 IP. Presión máxima 1×10^{-10} mbar.



Figura 24. Scrollvac SC 30 (Fuente pública)



Figura 25. MAG W600 IP (Fuente pública)

El funcionamiento del ciclo de vacío es el siguiente:

- En primer lugar arranca la bomba Scroll, comenzando a extraer el aire del interior del criostato que se encuentra a una presión de 1 bar. El principio de funcionamiento de esta bomba, como su nombre indica, es un sencillo mecanismo en forma de espiral. Una de las espirales orbita sobre la otra creando zonas que capturan el aire. El aire entra en la espiral por el perímetro y es desplazado y comprimido a lo largo de la espiral, hasta que finalmente es expulsado hacia el exterior por el centro de la misma.



Figura 26. Esquema bomba Scroll (Fuente pública)

- Una vez se ha alcanzado una presión interior en el criostato de 0,1 mbar entra en funcionamiento la bomba Turbomolecular. El funcionamiento de esta bomba es similar al de una turbina convencional. El aire es acelerado hacia el exterior al hacerlo colisionar contra una superficie móvil a gran velocidad. Está compuesta por varias etapas de álabes fijos y móviles con las aspas orientadas de forma inversa.

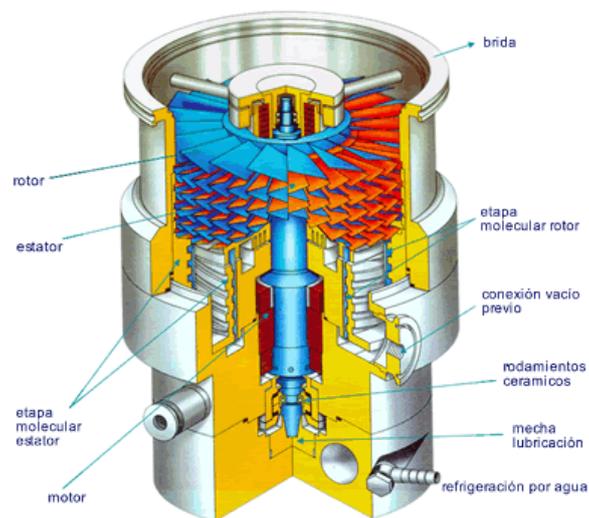


Figura 27. Esquema bomba Turbomolecular (Fuente pública)

12. Conexión de los elementos comerciales

12.1 Cabeza fría

A continuación, se muestran unas imágenes con la posición de la cabeza fría dentro del conjunto del instrumento:

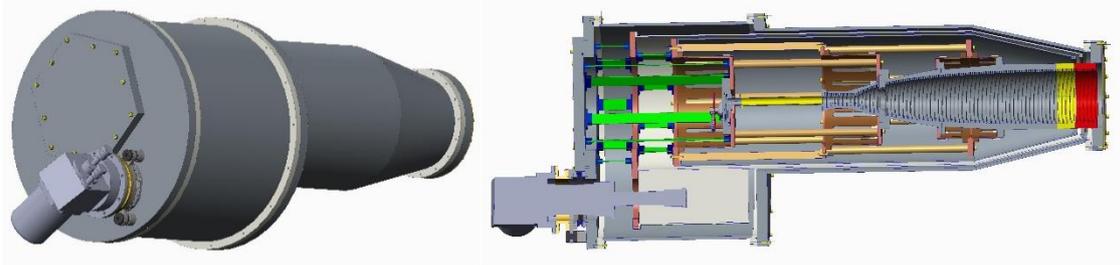


Figura 28. Posicionado de la cabeza fría (Fuente propia)

La conexión desde las etapas de la cabeza fría hasta los correspondientes platos fríos se realizará por medio de unos enlaces flexibles de cobre que conectaran directamente los platos fríos de 50 K y 20 K con las piezas de prolongación, también de cobre, de la primera y segunda etapa respectivamente:

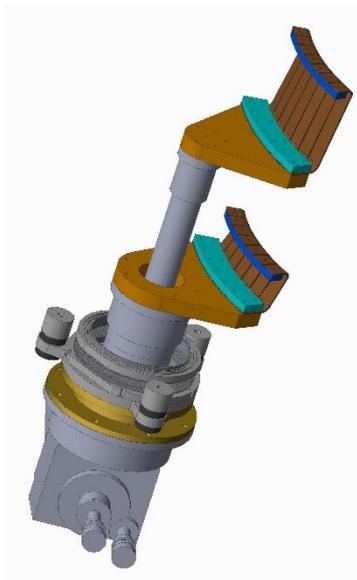


Figura 29. Conexiones flexibles de cobre (Fuente propia)

12.2 Sistema de vacío

Al no disponerse de los correspondientes modelos 3D del sistema de vacío y siendo completamente innecesario la elaboración de los mismos, se presentará una imagen real de un sistema de vacío operativo conectado a un criostato de menor dimensión. De esta manera se podrá asociar las dimensiones y conexiones del mismo.

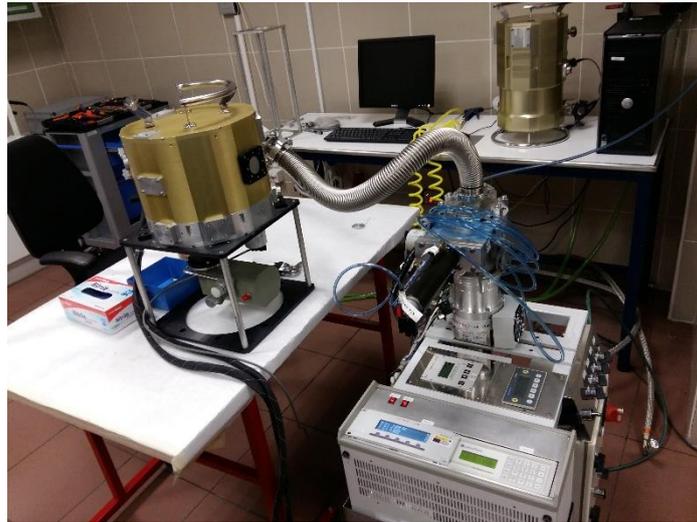


Figura 30. Sistema de vacío real

13. Alternativas

Debido a posibles complicaciones en la fabricación y montaje de las ya anteriormente mencionadas pinzas térmicas, dadas sus dimensiones, se ha pensado en una alternativa constructivamente más sencilla para sustituirlas.

Partiendo del mismo principio de diferencia de contracciones en materiales con diferentes coeficientes de expansión térmica, surge la idea de integrar el sistema de pinza térmica en una sola pieza, sin necesidad de tener la pinza y el plato al que va instalado por separado. Consiste en mecanizar en un plato plano de cobre una serie de ‘pestañas’ a las cuales se acoplará el aro de teflón. Una vez el teflón comience a contraerse más que el cobre, se producirá la flexión de estas pestañas, dando lugar a que se adhieran a la superficie deseada.

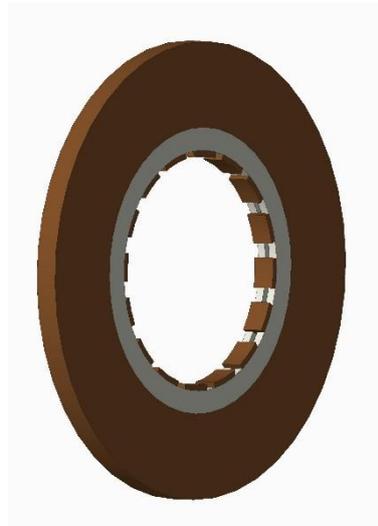


Figura 31. Alternativa pinza térmica (Fuente propia)

Queda pendiente realizar los correspondientes estudios térmicos y estructurales para verificar la posibilidad de que este sistema pueda sustituir a las pinzas térmicas. Debido a las correspondientes limitaciones no se expondrá tal desarrollo en el presente proyecto.

14. Conclusiones

Los diseños que se exponen y presentan durante todo el desarrollo del proyecto son diseños conceptuales. Aunque se respetarán las soluciones tomadas, así como el concepto general de diseño de cara a la fabricación, tanto las dimensiones finales como el cierre final del diseño dependerán de los resultados obtenidos en los estudios térmicos y estructurales generales, así como en una serie de estudios más específicos de los elementos críticos.

Las soluciones de diseño que se han tomado, han sido fruto tanto de las referencias existentes ya mencionadas como de decisiones personales, siempre supervisadas y orientadas por el tutor.

El diseño, aunque conceptual, es más que suficiente para poder realizar los correspondientes estudios térmicos y estructurales, así como para poder elaborar un presupuesto orientativo. Los resultados obtenidos, no siendo concluyentes, se ajustan tanto a los requerimientos técnicos del diseño como a las limitaciones físicas y comerciales establecidas.

15. Orden de prioridad entre los documentos básicos

- 1) Planos
- 2) Anexos
- 3) Memoria
- 4) Presupuesto

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Anexo I. Cálculos térmicos

PROYECTO FINAL DE GRADO

TÍTULO

**DISEÑO DEL PROTOTIPO DEL INSTRUMENTO CRIOGÉNICO MFIS
(MULTY FREQUENCY INSTRUMENT SOUTH) DEL EXPERIMENTO
QUIJOTE**

AUTOR

Adrián Lorenzo Rodríguez

Índice Anexo I. Cálculos térmicos

1. Introducción.....	4
2. Hipótesis.....	4
2.1. Transferencia de calor por conducción.....	4
2.2. Transferencia de calor por radiación.....	5
3. Materiales.....	6
3.1. Cobre OFHC.....	6
3.2. G10.....	7
3.3. Aluminio 6082 T6.....	7
4. Cálculos analíticos.....	7
4.1. Conducción.....	7
4.1.1. Conducción entre la tapa de vacío del receptor y el plato de la OMT.....	8
4.1.2. Conducción entre el plato frío de 20 K y el plato frío de 50 K.....	9
4.1.3. Conducción entre el plato frío de 50 K y la tapa de vacío.....	10
4.2. Radiación.....	10
4.2.1. Sección FAT.....	11
4.2.2. Sección SLIM.....	13
4.2.3. Sección CONE.....	14
4.2.4. Tapas y ventana.....	16
4.2.4.1. Tapa trasera de vacío.....	16
4.2.4.2. Tapa media de vacío.....	16
4.2.4.3. Ventana frontal de mylar.....	17
5. Cálculos computacionales.....	18
5.1. Conducción.....	18
5.1.1. Conducción entre la tapa de vacío del receptor y el plato de la OMT.....	18
5.1.2. Conducción entre el plato frío de 20 K y el plato frío de 50 K.....	19
5.1.3. Conducción entre el plato frío de 50 K y la tapa de vacío.....	19
5.2. Radiación.....	20
5.2.1. Sección FAT.....	20
5.2.2. Sección SLIM.....	22
5.2.3. Sección CONE.....	23
5.2.4. Tapas y ventana.....	24

5.2.4.1.	Tapa trasera de vacío	24
5.2.4.2.	Tapa media de vacío.....	25
5.2.4.3.	Ventana frontal de mylar.....	26
6.	Conclusiones	26
6.1.	Potencia térmica total a extraer	26
6.2.	Comparación de los valores analíticos frente a los computacionales	27

1. Introducción

En el presente anexo se determina la potencia térmica que es necesaria extraer del interior del criostato, en base al diseño conceptual, para mantener las condiciones de temperatura interior especificadas. A partir de este valor de potencia obtenido, se realizará el predimensionado de la cabeza fría que será necesaria utilizar para lograr dicho fin.

Para el estudio térmico solo se tendrán consideraciones de pérdidas térmicas por conducción y por radiación, ya que, como se ha mencionado con anterioridad, al hacer vacío en el interior del instrumento se eliminan los efectos de la transferencia por convección.

2. Hipótesis

A continuación, se indican las hipótesis que se han considerado para dar solución al problema planteado, así como los métodos analíticos empleados.

2.1. Transferencia de calor por conducción

La transferencia de calor por conducción es un proceso térmico en el que se transmite calor entre dos cuerpos en contacto directo con diferentes temperaturas. El flujo de calor, como establece el segundo principio de la termodinámica, tiene lugar desde el cuerpo de mayor temperatura al cuerpo de menor temperatura. La propiedad física de los materiales que caracteriza esta transferencia de calor es la conductividad térmica.

La conducción térmica está definida por la Ley de Fourier, que establece que el flujo de transferencia de calor por conducción en un medio isótropo es proporcional y de sentido contrario al gradiente de temperatura en esa dirección. En su forma integral, el calor que atraviesa una superficie "S" por unidad de tiempo viene dado por la expresión:

$$\frac{dQ_s}{dt} = \int_S q \cdot dS = -k \int_S \nabla T \cdot dS$$

Para la resolución analítica se tomará el caso simplificado de flujo de calor estacionario en una sola dirección, en el que el calor transmitido es proporcional al área perpendicular al flujo de calor, a la conductividad del material y a la diferencia de temperatura, y es inversamente proporcional al espesor:

$$\frac{Q}{\Delta t} = \frac{kA}{x} (T_1 - T_2) \quad \text{Ecuación 1}$$

Dado que es un caso estacionario y que la conductividad térmica depende de la temperatura, se utilizará un coeficiente de conductividad térmica medio entre los dos coeficientes a las temperaturas de estudio.

2.2. Transferencia de calor por radiación

La radiación térmica es la radiación que un cuerpo emite debido a su temperatura. Todo cuerpo emite radiación electromagnética, siendo su magnitud dependiente de la temperatura y longitud de onda considerada. Dentro del espectro electromagnético, la transferencia de calor por radiación se corresponde con la región infrarroja, con un rango de longitudes de onda de 0,1 μm a 1000 μm .

Para definir la transferencia de calor por radiación se utilizará la ley de Stefan-Boltzmann. Dicha ley establece que un cuerpo negro emite radiación térmica con una potencia emisiva hemisférica total proporcional a la cuarta potencia de su temperatura:

$$E = \sigma \cdot T^4$$

$$\sigma \equiv \text{Constante de Stefan - Boltzmann} = 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

La potencia emisiva superficial de una superficie real es menor que la de un cuerpo negro a la misma temperatura, la cual se define como:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

Donde “ ε ” es la propiedad radiativa de la superficie denominada emisividad. Esta propiedad es la relación entre la radiación emitida por una superficie real y la emitida por el cuerpo negro a la misma temperatura. Este valor dependerá del material considerado.

El flujo de calor que emite un cuerpo:

$$q = A \cdot E = A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad \text{Ecuación 2}$$

Para el cálculo de intercambios de radiación entre dos cuerpos negros, interviene en la ecuación anterior el llamado factor de forma “F”, el cual determina la fracción de la

energía total emitida por una superficie que es percibida por otra superficie. Es un factor únicamente geométrico.

Para este caso particular, el intercambio de radiación en una cavidad cerrada entre dos superficies reales se define como:

$$q_{12} = \frac{\sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \cdot A_1} + \frac{1}{A_1 \cdot F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 \cdot A_2}} \quad \text{Ecuación 3}$$

En el caso particular del instrumento, se considerará como superficie emisiva a la temperatura ambiente el entorno, para el cual se considera un área infinita. La ecuación queda simplificada de la siguiente forma:

$$A_2 = \infty \rightarrow \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 \cdot A_2} = 0$$

$$q_{12} = \frac{\sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \cdot A_1} + \frac{1}{A_1 \cdot F_{12}}} \quad \text{Ecuación 4}$$

3. Materiales

A continuación, se mencionarán y describirán brevemente los principales materiales con los que se ha diseñado el instrumento, siendo estos de gran importancia para cumplir con los requerimientos térmicos y estructurales.

3.1. Cobre OFHC

El cobre OFHC (Oxygen-Free High thermal Conductivity) es un tipo de cobre de alta pureza, con un contenido de cobre superior al 99,99%. Esto da lugar a obtener en este material las propiedades del cobre elemental, como son la alta ductilidad, alta conductividad térmica y eléctrica, alta resistencia a los impactos, facilidad de soldadura y baja volatilidad relativa en vacío.

Dadas las propiedades mencionadas, este material es ampliamente utilizado en aplicaciones criogénicas. Aprovechando su alta conductividad térmica, se utiliza en el proyecto a modo de enlace térmico para extraer toda la potencia necesaria del interior.

3.2. G10

El G10 es un composite a base de finas capas de fibra de vidrio entrecruzado y resina de epoxi, el cual es curado por medio de calor y alta presión. Tiene una densidad de 5 capas de tejido por milímetro de material aproximadamente. Es un material con una alta resistencia mecánica a bajas temperaturas, elevada resistencia a la fatiga, así como un perfecto aislante térmico.

Teniendo en cuenta sus propiedades, dentro de las aplicaciones criogénicas, es el material idóneo para unir rígidamente elementos entre sí manteniendo un desacople térmico para reducir las pérdidas térmicas por conducción.

3.3. Aluminio 6082 T6

Es una aleación específica de aluminio la cual ofrece altas prestaciones tales como buena soldabilidad, alta resistencia a la corrosión y buena formabilidad y maquinabilidad. Junto con el tratamiento térmico T6, el cual mejora considerablemente sus propiedades mecánicas, es un material interesante para aplicaciones criogénicas.

Debido a su relación de alta resistencia mecánica frente a la ligereza, así como el resto de propiedades características, es una buena elección para la fabricación tanto de los shields como de la envolvente exterior de vacío del instrumento.

4. Cálculos analíticos

4.1. Conducción

A continuación, se presentan los cálculos analíticos referentes a la potencia térmica transferida por conducción por el método ya mencionado anteriormente en el apartado 2 de este anexo. Como y ase indicó, sólo se considera conducción entre elementos unidos físicamente con diferentes temperaturas.

4.1.1. Conducción entre la tapa de vacío del receptor y el plato de la OMT

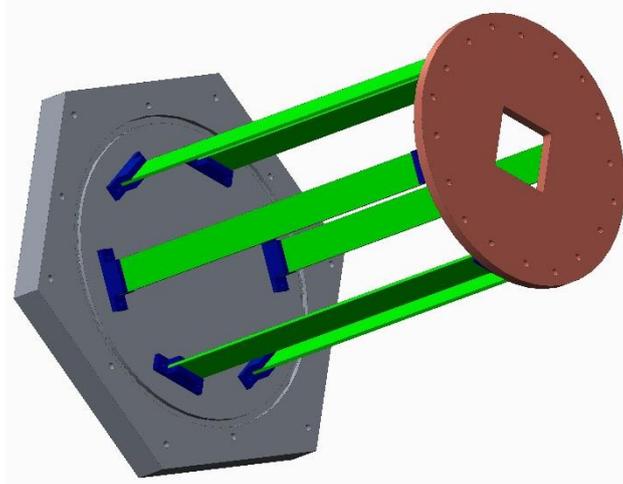


Figura 32. Conexión de la tapa vacío receptor con el plato de la OMT (Fuente propia)

DATOS:

- Temperaturas:

$$T_{ext} = 300 \text{ K} \quad T_{int} = 20 \text{ K} \quad \Delta T_1 = T_{ext} - T_{int} = 280 \text{ K}$$

- Coeficientes de conductividad térmica:

$$k_{G10_{300K}} = 0,98 \frac{W}{mK} \quad k_{G10_{20K}} = 0,1875 \frac{W}{mK}$$

- Dimensiones:

$$b = 30 \text{ mm} \quad h = 3 \text{ mm} \quad A = b \cdot h = 0,00009 \text{ m}^2 \quad L_1 = 395,26 \text{ mm} \quad n_1 = 6$$

- Potencia transferida según la ecuación 1:

$$Q_1 = - \frac{(k_{G10_{300K}} + k_{G10_{20K}})}{2} \cdot A \cdot \frac{\Delta T_1}{L_1} \cdot n_1 = -0,2233 \text{ W}$$

4.1.2. Conducción entre el plato frío de 20 K y el plato frío de 50 K

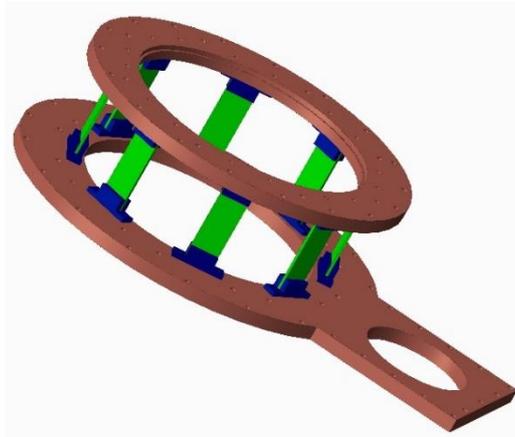


Figura 33. Conexión entre el plato frío de 20 K y el plato frío de 50 K (Fuente propia)

DATOS:

- Temperatura:

$$T_{S_{50K}} = 50 \text{ K} \quad T_{S_{20K}} = 20 \text{ K} \quad \Delta T_2 = T_{S_{50K}} - T_{S_{20K}} = 30 \text{ K}$$

- Coeficientes de conductividad térmica:

$$k_{G10_{50K}} = 0,26 \frac{W}{mK} \quad k_{G10_{20K}} = 0,1875 \frac{W}{mK}$$

- Dimensiones:

$$b = 30 \text{ mm} \quad h = 3 \text{ mm} \quad A = b \cdot h = 0,00009 \text{ m}^2 \quad L_2 = 90 \text{ mm} \quad n_2 = 8$$

- Potencia transferida según la ecuación 1:

$$Q_2 = - \frac{(k_{G10_{50K}} + k_{G10_{20K}})}{2} \cdot A \cdot \frac{\Delta T_2}{L_2} \cdot n_2 = -0,0537 \text{ W}$$

4.1.3. Conducción entre el plato frío de 50 K y la tapa de vacío

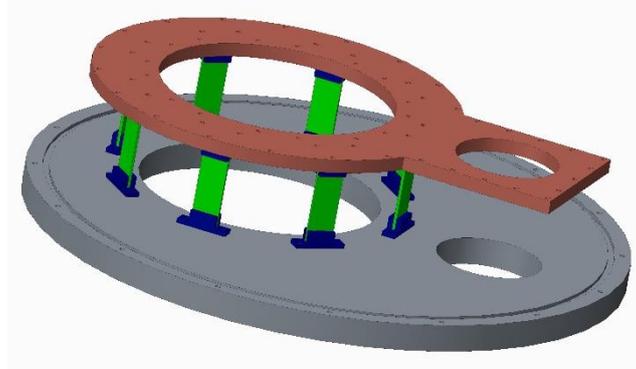


Figura 34. Conexión entre el plato frío de 50 K y la tapa de vacío (Fuente propia)

DATOS:

- Temperaturas:

$$T_{S_{50K}} = 50 \text{ K} \quad T_{ext} = 300 \text{ K} \quad \Delta T_3 = T_{ext} - T_{S_{50K}} = 250 \text{ K}$$

- Coeficientes de conductividad térmica:

$$k_{G10_{300K}} = 0,98 \frac{W}{mK} \quad k_{G10_{50K}} = 0,26 \frac{W}{mK}$$

- Dimensiones:

$$b = 30 \text{ mm} \quad h = 3 \text{ mm} \quad A = b \cdot h = 0,00009 \text{ m}^2 \quad L_3 = 90 \text{ mm} \quad n_3 = 8$$

- Potencia transferida según la ecuación 1:

$$Q_3 = - \frac{(k_{G10_{300K}} + k_{G10_{50K}})}{2} \cdot A \cdot \frac{\Delta T_3}{L_3} \cdot n_3 = -1,24 \text{ W}$$

4.2. Radiación

A continuación, se presentan los cálculos analíticos referentes a la potencia térmica transferida por radiación por el método ya mencionado anteriormente en el apartado 2 de este anexo.

Para simplificar y organizar los cálculos se han dividido las superficies de radiación del criostato en tres secciones como se muestra en la figura:

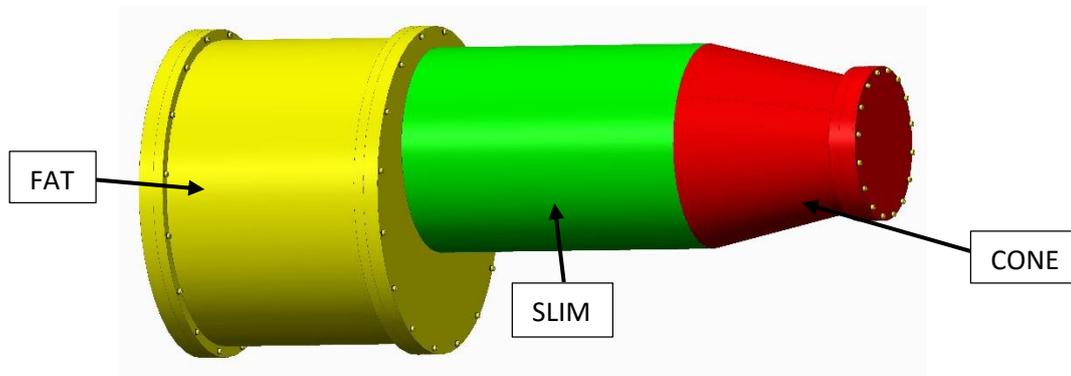


Figura 35. Secciones de radiación del criostato (Fuente propia)

Las tres secciones se calcularán como cilindros concéntricos. Para simplificar los cálculos de la sección cónica, se ha tomado como válida aproximarla a una sección cilíndrica con diámetro el diámetro medio del cono.

4.2.1. Sección FAT

Se representa el corte de una vista simplificada equivalente de la sección FAT para el cálculo de la potencia transferida por radiación, indicando a que corresponden los subíndices utilizados en las ecuaciones posteriores:

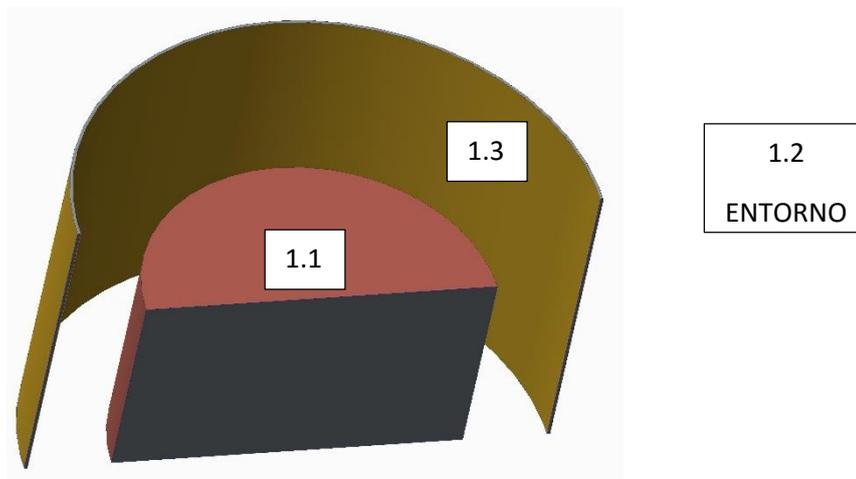


Figura 36. Vista sección FAT (Fuente propia)

DATOS:

- Factores de forma:

$$F_{1_{3,1}} = \frac{R_1}{R_3} = \frac{0,181}{0,2665} = 0,67917 \quad F_{1_{3,2}} = 1$$

- Dimensiones:

$$R_{1,3} = \frac{533 \text{ mm}}{2} = 0,2665 \text{ m} \quad R_{1,1} = \frac{356 \text{ mm}}{2} = 0,178 \text{ m}$$

$$L_{1,3} = 330 \text{ mm} \quad L_{1,1} = 215 \text{ mm}$$

$$A_{1,1} = 2 \cdot \pi \cdot R_{1,1} \cdot L_{1,1} = 0,24046 \text{ m}^2 \quad A_{1,3} = 2 \cdot \pi \cdot R_{1,3} \cdot L_{1,3} = 0,55257 \text{ m}^2$$

- Temperaturas:

$$T_2 = 300 \text{ K} \quad T_3 = 50 \text{ K} \quad T_1 = 20 \text{ K}$$

- Coeficientes de emisividad térmica:

$$\varepsilon_2 = 0,1 \quad \varepsilon_3 = 0,058 \quad \varepsilon_1 = 0,055$$

- Potencia térmica transferida desde la sección 1.3 a la sección 1.1 según la ecuación 3:

$$Q_{1_{13}} = \frac{\sigma \cdot (T_1^4 - T_3^4)}{\frac{1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3 \cdot A_{1,3}} + \frac{1}{A_{1,3} \cdot F_{1_{3,1}}} + \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \cdot A_{1,1}}} = -0,00334 \text{ W}$$

- Potencia térmica transferida desde el entorno a la sección 1.3 según la ecuación 4:

$$Q_{1_{23}} = \frac{\sigma \cdot (T_3^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3 \cdot A_{1,3}} + \frac{1}{A_{1,3} \cdot F_{1_{3,2}}}} = -14,70898 \text{ W}$$

- Potencia térmica total transferida hacia la sección FAT:

$$Q_{FAT} = Q_{1_{13}} + Q_{1_{23}} = -14,71231 \text{ W}$$

4.2.2. Sección SLIM

Se representa el corte de una vista simplificada equivalente de la sección SLIM para el cálculo de la potencia transferida por radiación, indicando a que corresponden los subíndices utilizados en las ecuaciones posteriores:

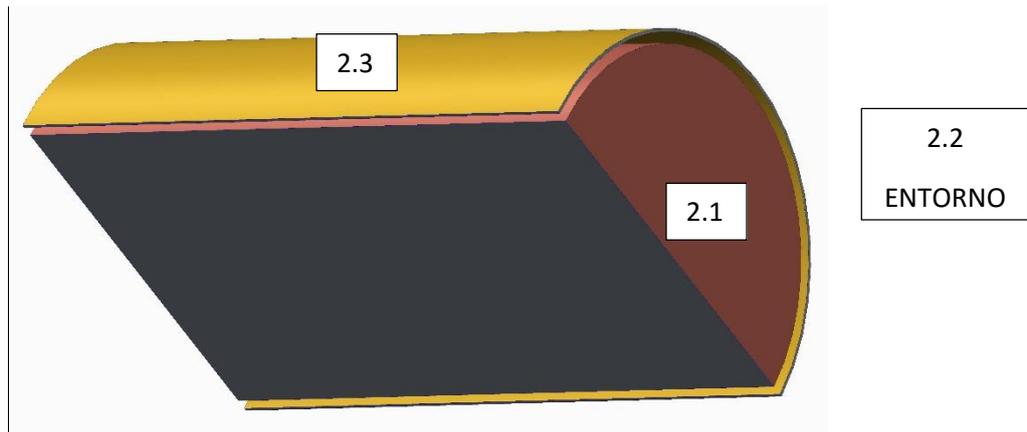


Figura 37. Vista sección SLIM (Fuente propia)

DATOS:

- Factores de forma:

$$F_{2.3,1} = \frac{R_1}{R_3} = \frac{0,181}{0,191} = 0,94764 \quad F_{2.3,2} = 1$$

- Dimensiones:

$$R_{2.3} = \frac{382 \text{ mm}}{2} = 0,191 \text{ m} \quad R_{2.1} = \frac{356 \text{ mm}}{2} = 0,178 \text{ m}$$

$$L_{2.3} = 575 \text{ mm} \quad L_{2.1} = 575 \text{ mm}$$

$$A_{2.1} = 2 \cdot \pi \cdot R_{2.1} \cdot L_{2.1} = 0,64308 \text{ m}^2 \quad A_{2.3} = 2 \cdot \pi \cdot R_{2.3} \cdot L_{2.3} = 0,6901 \text{ m}^2$$

- Temperaturas:

$$T_2 = 300 \text{ K} \quad T_3 = 50 \text{ K} \quad T_1 = 20 \text{ K}$$

- Coeficientes de emisividad térmica:

$$\varepsilon_2 = 0,1 \quad \varepsilon_3 = 0,058 \quad \varepsilon_1 = 0,055$$

- Potencia térmica transferida desde la sección 2.3 a la sección 2.1 según la ecuación 3:

$$Q_{2_{13}} = \frac{\sigma \cdot (T_1^4 - T_3^4)}{\frac{1 - \epsilon_3}{\epsilon_3 \cdot A_{2.3}} + \frac{1}{A_{2.3} \cdot F_{2_{3,1}}} + \frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 \cdot A_{2.1}}} = -0,00667 \text{ W}$$

- Potencia térmica transferida desde el entorno a la sección 2.3 según la ecuación 4:

$$Q_{2_{23}} = \frac{\sigma \cdot (T_3^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \epsilon_3}{\epsilon_3 \cdot A_{2.3}} + \frac{1}{A_{2.3} \cdot F_{1_{3,2}}}} = -18,36845 \text{ W}$$

- Potencia térmica total transferida hacia la sección SLIM:

$$Q_{SLIM} = Q_{2_{13}} + Q_{2_{23}} = -18,37512 \text{ W}$$

4.2.3. Sección CONE

Se representa el corte de una vista simplificada equivalente de la sección CONE para el cálculo de la potencia transferida por radiación, indicando a que corresponden los subíndices utilizados en las ecuaciones posteriores:

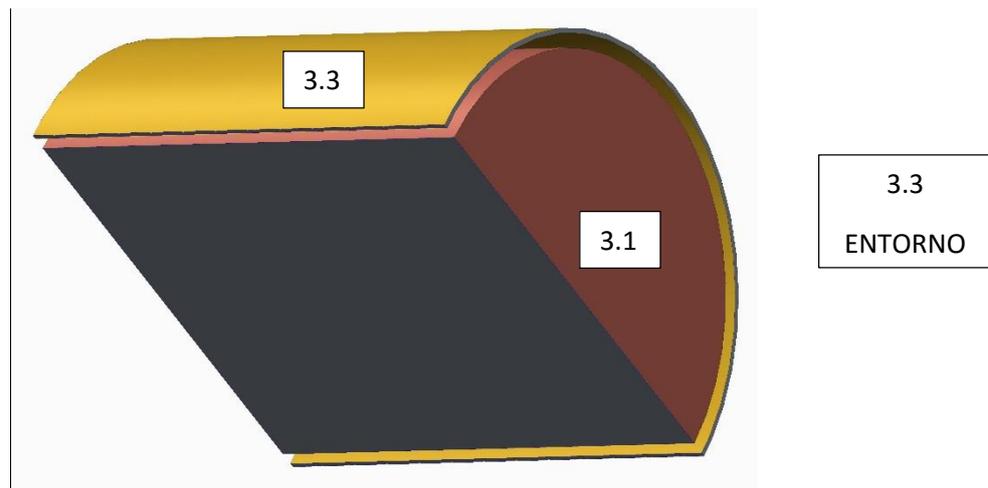


Figura 38. Vista sección CONE (Fuente propia)

DATOS:

- Factores de forma:

$$F_{3,1} = \frac{R_1}{R_3} = \frac{0,144}{0,156} = 0,92308 \quad F_{3,2} = 1$$

- Dimensiones:

$$R_{3,3} = \frac{312 \text{ mm}}{2} = 0,156 \text{ m} \quad R_{3,1} = \frac{288 \text{ mm}}{2} = 0,144 \text{ m}$$

$$L_{3,2} = 310 \text{ mm} \quad L_{3,3} = 310 \text{ mm} \quad L_{3,1} = 310 \text{ mm}$$

$$A_{3,1} = 2 \cdot \pi \cdot R_{3,1} \cdot L_{3,1} = 0,28048 \text{ m}^2 \quad A_{3,3} = 2 \cdot \pi \cdot R_{3,3} \cdot L_{3,3} = 0,30385 \text{ m}^2$$

- Temperaturas:

$$T_2 = 300 \text{ K} \quad T_3 = 50 \text{ K} \quad T_1 = 20 \text{ K}$$

- Coeficientes de emisividad térmica:

$$\varepsilon_2 = 0,1 \quad \varepsilon_3 = 0,058 \quad \varepsilon_1 = 0,055$$

- Potencia térmica transferida desde la sección 3.3 a la sección 3.1 según la ecuación 3:

$$Q_{3,13} = \frac{\sigma \cdot (T_1^4 - T_3^4)}{\frac{1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3 \cdot A_{3,3}} + \frac{1}{A_{3,3} \cdot F_{3,1}} + \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \cdot A_{3,1}}} = -0,00292 \text{ W}$$

- Potencia térmica transferida desde el entorno a la sección 3.3 según la ecuación 4:

$$Q_{2,33} = \frac{\sigma \cdot (T_3^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3 \cdot A_{3,3}} + \frac{1}{A_{3,3} \cdot F_{3,2}}} = -8,08831 \text{ W}$$

- Potencia térmica total transferida hacia la sección CONE:

$$Q_{CONE} = Q_{3,13} + Q_{2,33} = -8,09123 \text{ W}$$

4.2.4. Tapas y ventana

Por diferencias geométricas se ha separado el cálculo de los efectos de la radiación en las tapas y en la ventana, que se calculará como planos paralelos.

4.2.4.1. Tapa trasera de vacío

Se considerará que la tapa es completamente maciza, para aproximarla a un área equivalente de radiación del lado de la seguridad sin contemplar los orificios.

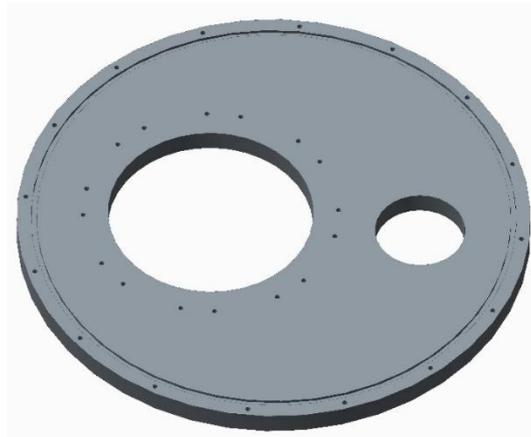


Figura 39. Tapa de vacío trasera (Fuente propia)

DATOS:

$$D_{TAPA_1} = 650 \text{ mm} \quad T_{TAPA_1} = 300 \text{ K} \quad T_{int} = 20 \text{ K}$$

$$A_{TAPA_1} = \frac{\pi \cdot D_{TAPA_1}^2}{4} = 0,332 \text{ m}^2 \quad \varepsilon_{efe} = 0,0775 \quad F_{TAPA_1} = 0,5$$

- Potencia térmica transferida a través de la tapa trasera de vacío según la ecuación 2:

$$Q_{TAPA_1} = \sigma \cdot A_{TAPA_1} \cdot \varepsilon_{efe} \cdot F_{TAPA_1} \cdot (T_{int}^4 - T_{TAPA_1}^4) = -5,9058 \text{ W}$$

4.2.4.2. Tapa media de vacío

Para esta tapa si se considerará el orificio, ya que los efectos de radiación que corresponden a él están cubiertos por la sección SLIM mencionada anteriormente.

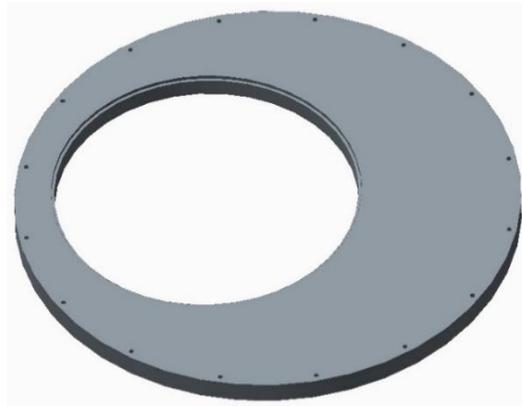


Figura 40. Tapa de vacío media (Fuente propia)

DATOS:

$$D_{TAPA_2} = 650 \text{ mm} \quad D_{ORIF} = 406 \text{ mm} \quad T_{TAPA_2} = 300 \text{ K} \quad T_{int} = 20 \text{ K}$$

$$A_{TAPA_1} = \frac{\pi \cdot (D_{TAPA_2}^2 - D_{ORIF}^2)}{4} = 0,2024 \text{ m}^2 \quad \varepsilon_{efe} = 0,0775 \quad F_{TAPA_2} = 0,5$$

- Potencia térmica transferida a través de la tapa media de vacío según la ecuación 2:

$$Q_{TAPA_2} = \sigma \cdot A_{TAPA_2} \cdot \varepsilon_{efe} \cdot F_{TAPA_2} \cdot (T_{int}^4 - T_{TAPA_2}^4) = -3,602 \text{ W}$$

4.2.4.3. Ventana frontal de mylar

Para la ventana de mylar se considerará un disco macizo plano con las dimensiones que corresponden.

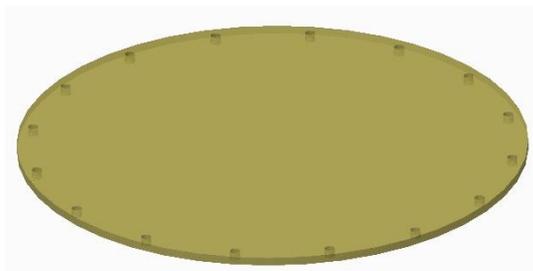


Figura 41. Ventana de mylar (Fuente propia)

DATOS:

$$D_{VENTANA} = 180 \text{ mm} \quad T_{VENTANA} = 300 \text{ K} \quad T_{int} = 20 \text{ K}$$

$$A_{VENTANA} = \frac{\pi \cdot D_{VENTANA}^2}{4} = 0,02545 \text{ m}^2 \quad \varepsilon_{efe} = 0,95 \quad F_{VENTANA} = 0,5$$

- Potencia térmica transferida a través de la ventana frontal de mylar según la ecuación 2:

$$Q_{VENTANA} = \sigma \cdot A_{VENTANA} \cdot \varepsilon_{efe} \cdot F_{VENTANA} \cdot (T_{int}^4 - T_{VENTANA}^4) = -5,5516 \text{ W}$$

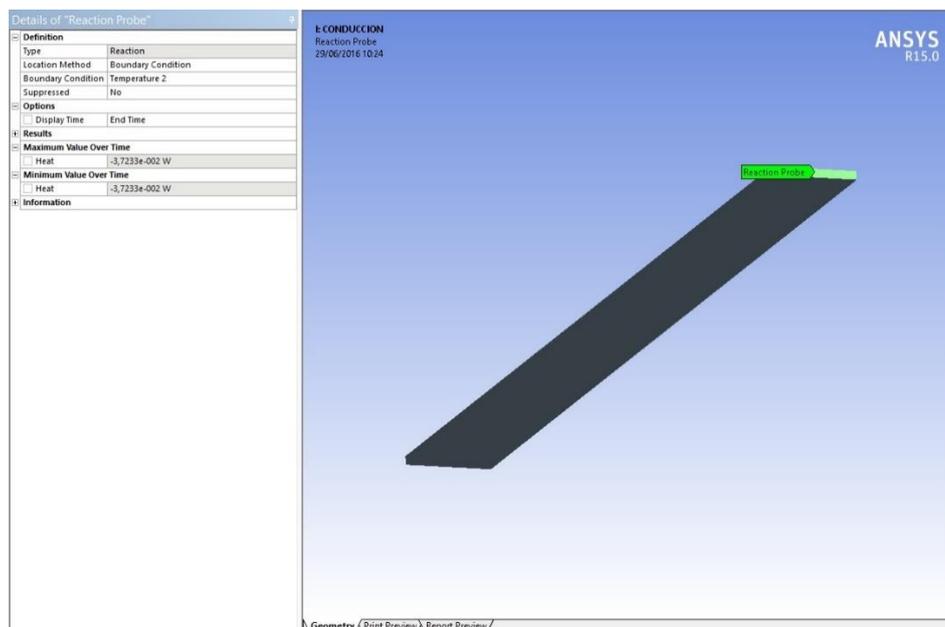
5. Cálculos computacionales

5.1. Conducción

A continuación, se presentarán capturas de pantalla con los resultados obtenidos para la transferencia de calor por conducción de los diferentes casos planteados, por medio de la simulación de un estudio térmico estacionario con el programa ANSYS.

5.1.1. Conducción entre la tapa de vacío del receptor y el plato de la OMT

Potencia térmica transmitida por conducción a través de una pletina de G10 de sección 3x30 mm² y longitud 395,26 mm, con un salto térmico de 300 K a 20 K.



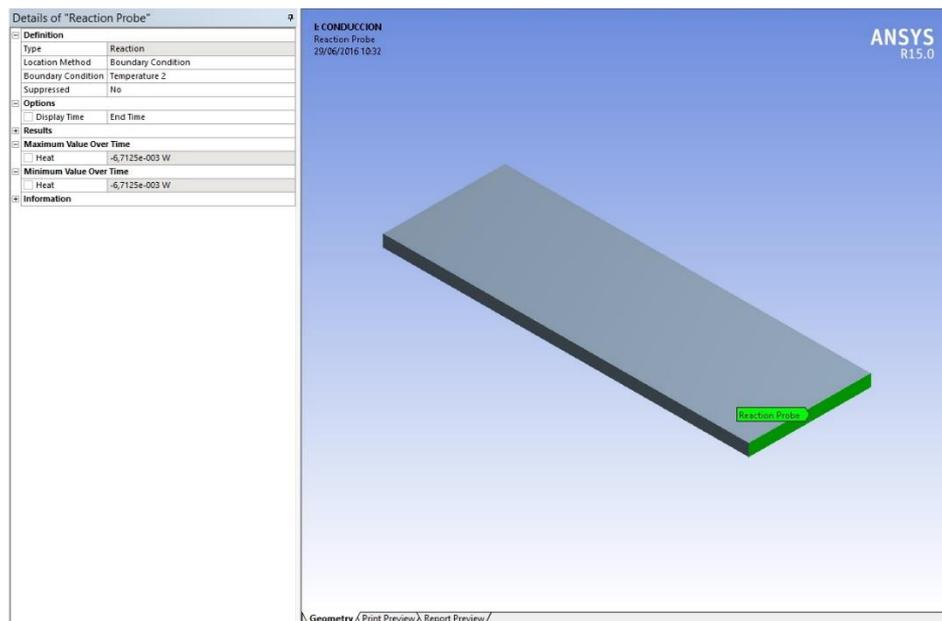
Captura 1. Conducción entre la tapa de vacío del receptor y el plato de la OMT (Fuente propia)

Potencia térmica transmitida por 1 pletina $\rightarrow Q_{0.1} = -0,037 W$

Potencia térmica transmitida por 6 pletinas $\rightarrow Q_1 = -0,223 W$

5.1.2. Conducción entre el plato frío de 20 K y el plato frío de 50 K

Potencia térmica transmitida por conducción a través de una pletina de G10 de sección $3 \times 30 \text{ mm}^2$ y longitud 90 mm, con un salto térmico de 50 K a 20 K.



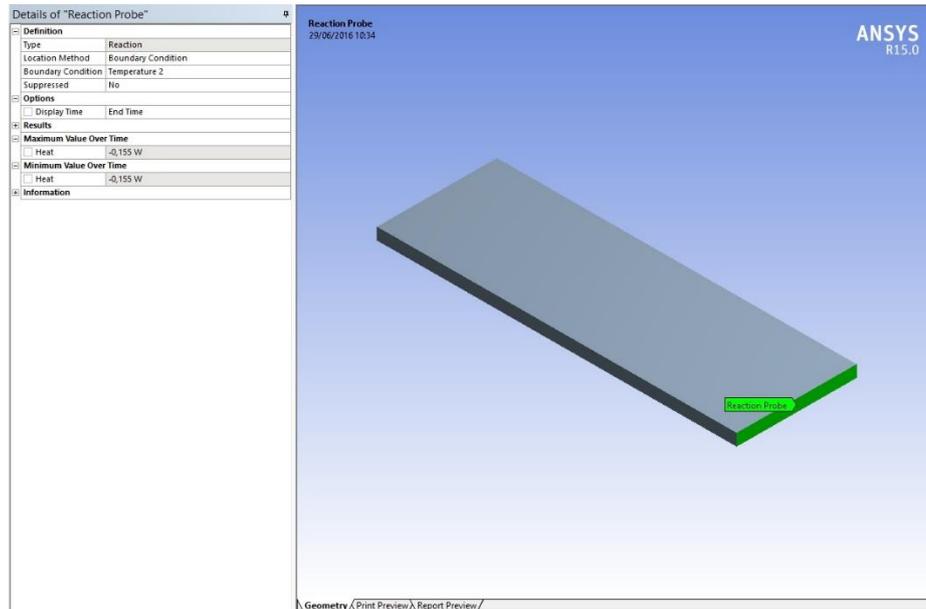
Captura 2. Conducción entre el plato frío de 20 K y el plato frío de 50 K (Fuente propia)

Potencia térmica transmitida por 1 pletina $\rightarrow Q_{0.2} = -0,00671 W$

Potencia térmica transmitida por 8 pletinas $\rightarrow Q_2 = -0,0537 W$

5.1.3. Conducción entre el plato frío de 50 K y la tapa de vacío

Potencia térmica transmitida por conducción a través de una pletina de G10 de sección $3 \times 30 \text{ mm}^2$ y longitud 90 mm, con un salto térmico de 300 K a 50 K.



Captura 3. Conducción entre el plato frío de 50 K y la tapa de vacío (Fuente propia)

Potencia térmica transmitida por 1 pletina $\rightarrow Q_{0,3} = -0,155 \text{ W}$

Potencia térmica transmitida por 8 pletinas $\rightarrow Q_3 = -1,24 \text{ W}$

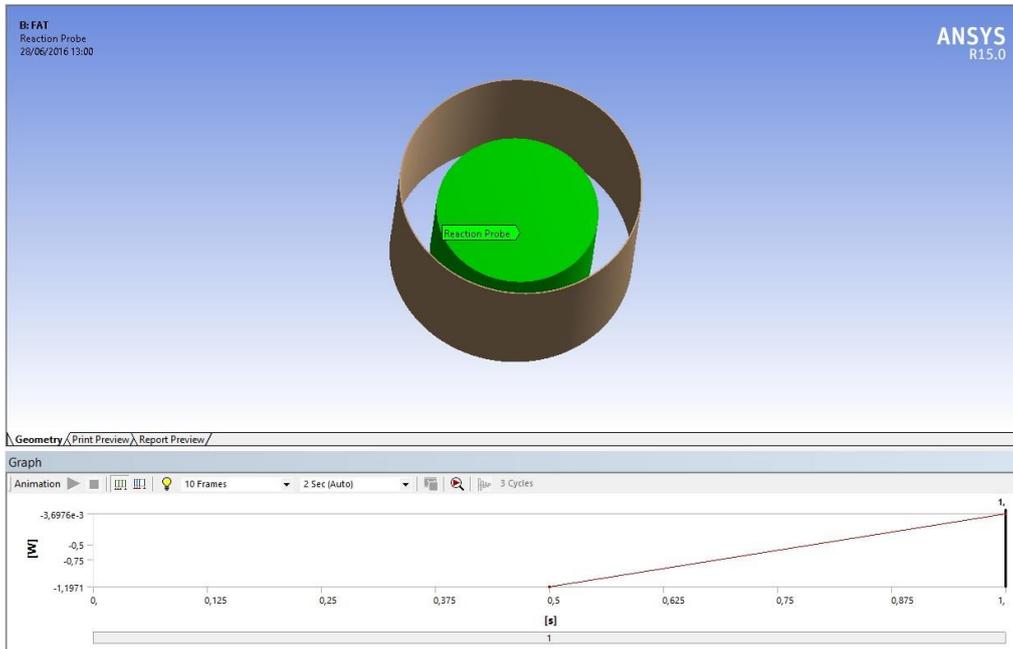
5.2. Radiación

A continuación, se presentarán capturas de pantalla con los resultados obtenidos para la transferencia de calor por radiación de los diferentes casos planteados, por medio de la simulación de un estudio térmico estacionario con el programa ANSYS.

Para los casos de radiación en cilindros concéntricos, el programa muestra un gráfico potencia frente a tiempo, en un intervalo establecido de simulación de 1 segundo.

5.2.1. Sección FAT

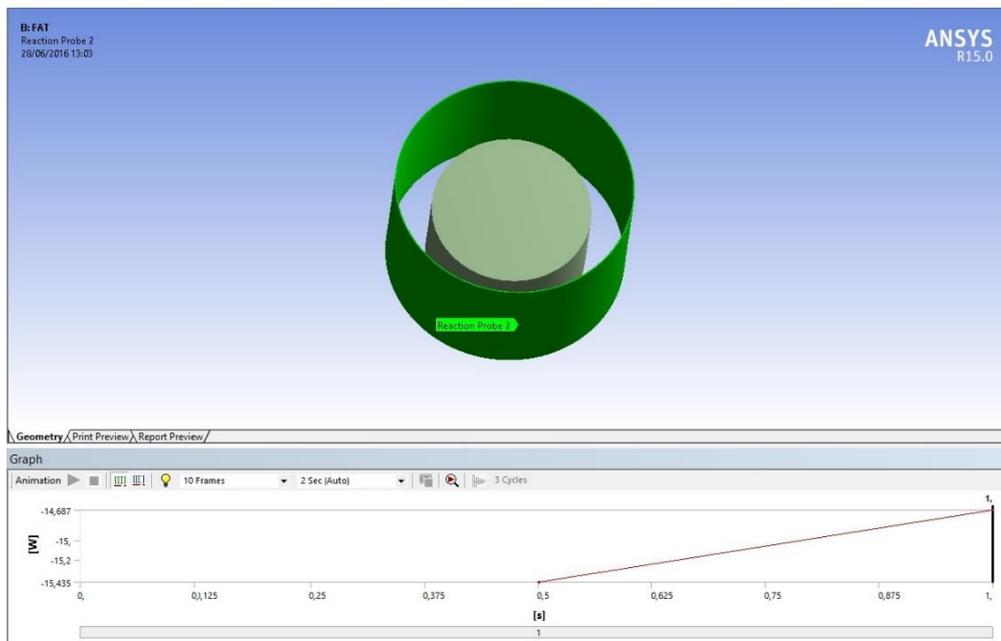
Potencia térmica transmitida por radiación entre dos cilindros concéntricos, correspondientes a la sección FAT ya mencionada, con un salto térmico de 50 K a 20 K.



Captura 4. Radiación en la sección FAT 1 (Fuente propia)

$$Q_{1,3} = -0,0037 \text{ W}$$

Potencia térmica transmitida por radiación entre un cilindro y el entorno, correspondientes a la sección FAT ya mencionada, con un salto térmico de 300 K a 50 K.

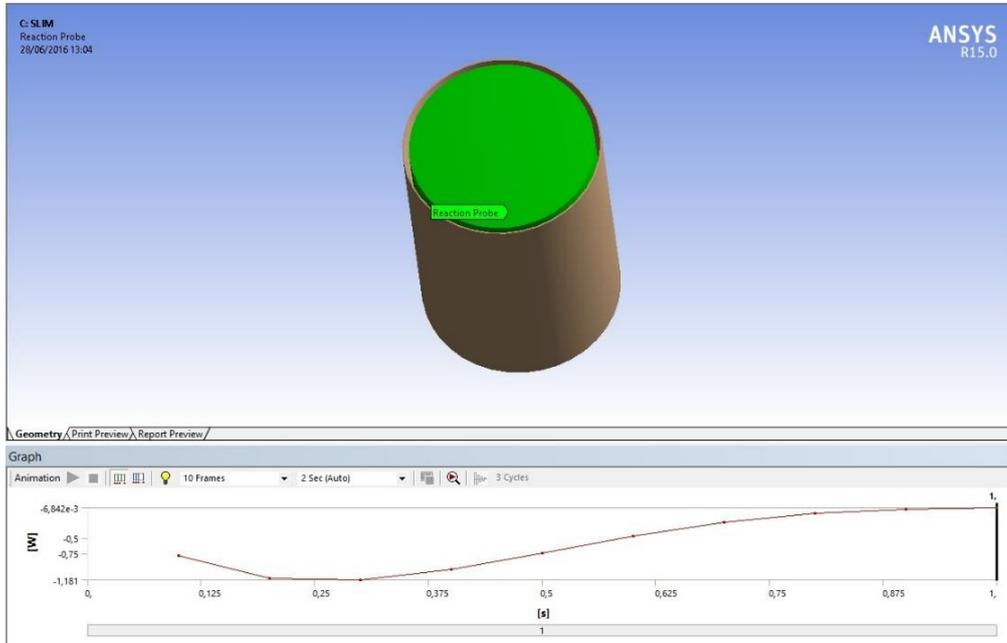


Captura 5. Radiación en la sección FAT 2 (Fuente propia)

$$Q_{1,3} = -14,687 \text{ W}$$

5.2.2. Sección SLIM

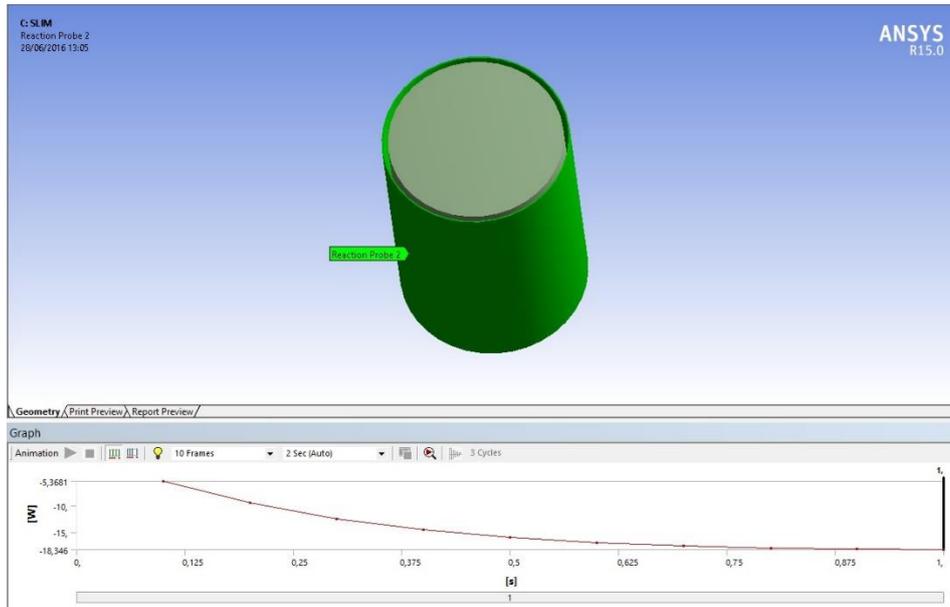
Potencia térmica transmitida por radiación entre dos cilindros concéntricos, correspondientes a la sección SLIM ya mencionada, con un salto térmico de 50 K a 20 K.



Captura 6. Radiación en la sección SLIM 1 (Fuente propia)

$$Q_{2,3} = -0,0068 \text{ W}$$

Potencia térmica transmitida por radiación entre un cilindro y el entorno, correspondientes a la sección SLIM ya mencionada, con un salto térmico de 300 K a 50 K.

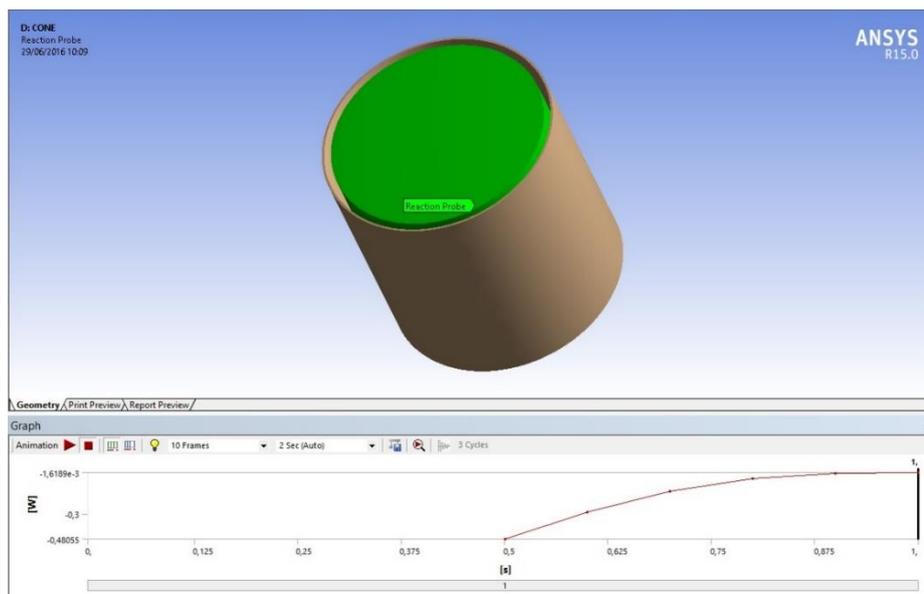


Captura 7. Radiación en la sección SLIM 2 (Fuente propia)

$$Q_{2,3} = -18,346 \text{ W}$$

5.2.3. Sección CONE

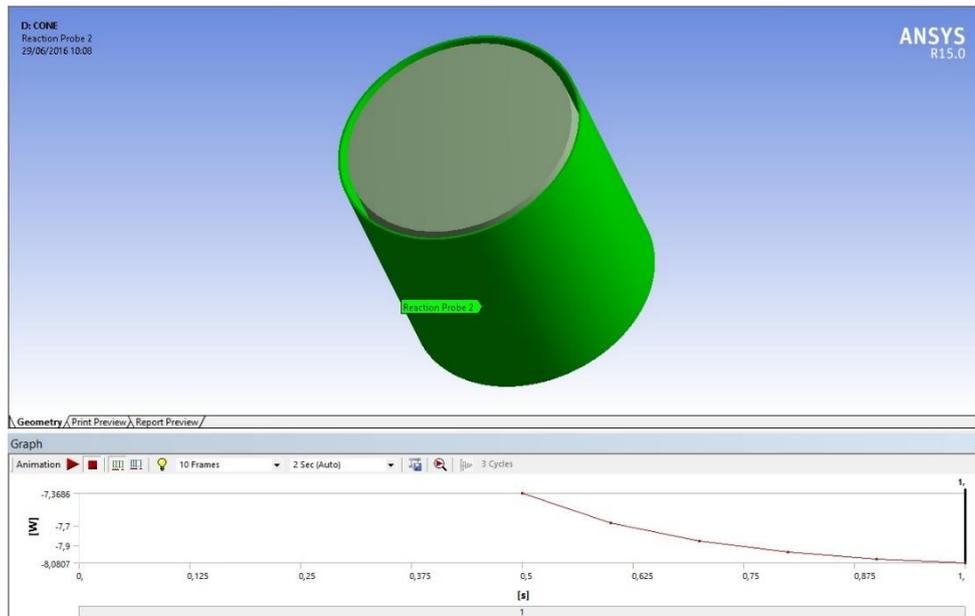
Potencia térmica transmitida por radiación entre dos cilindros concéntricos, correspondientes a la sección CONE ya mencionada, con un salto térmico de 50 K a 20 K.



Captura 8. Radiación en la sección CONE 1 (Fuente propia)

$$Q_{3_{1,3}} = -0,0016 \text{ W}$$

Potencia térmica transmitida por radiación entre un cilindro y el entorno, correspondientes a la sección CONE ya mencionada, con un salto térmico de 300 K a 50 K.



Captura 9. Radiación en la sección CONE 2 (Fuente propia)

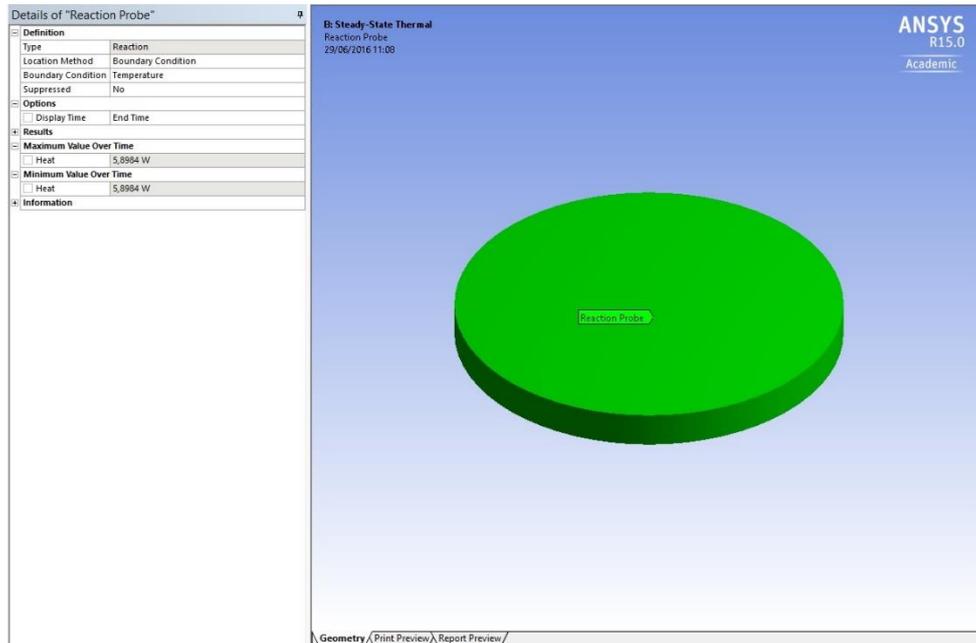
$$Q_{3_{2,3}} = -8,081 \text{ W}$$

5.2.4. Tapas y ventana

A continuación, se presentarán capturas de pantalla con los resultados obtenidos para la transferencia de calor por radiación de las tapas de vacío y la ventana frontal, por medio de la simulación de un estudio térmico estacionario con el programa ANSYS.

5.2.4.1. Tapa trasera de vacío

Potencia térmica transferida por radiación por la tapa trasera de vacío:

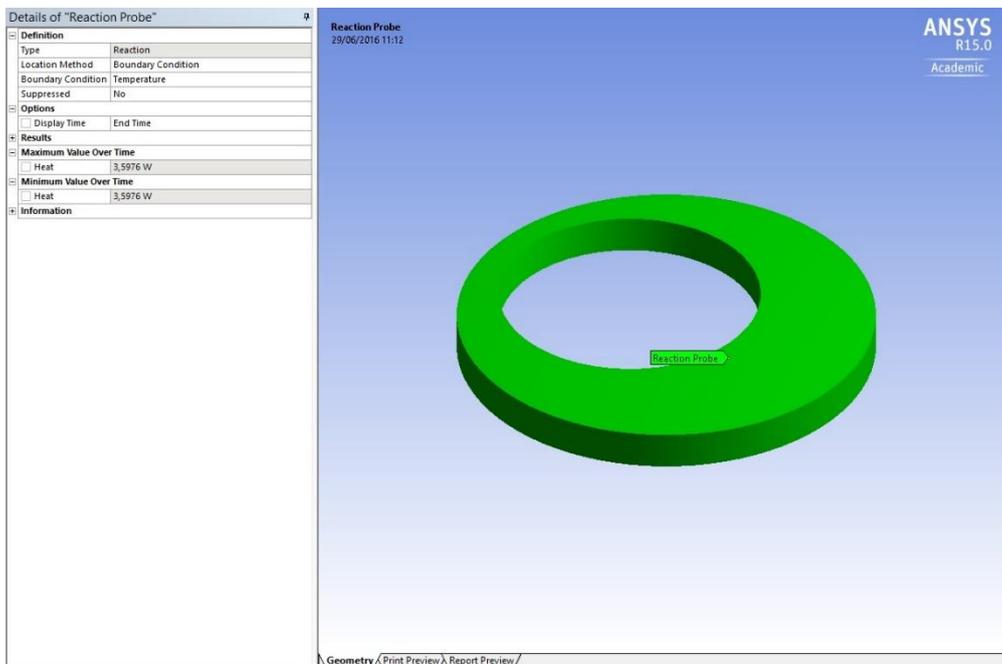


Captura 10. Radiación en la tapa trasera de vacío (Fuente propia)

$$Q_1 = -5,898 \text{ W}$$

5.2.4.2. Tapa media de vacío

Potencia térmica transferida por radiación por la tapa media de vacío:

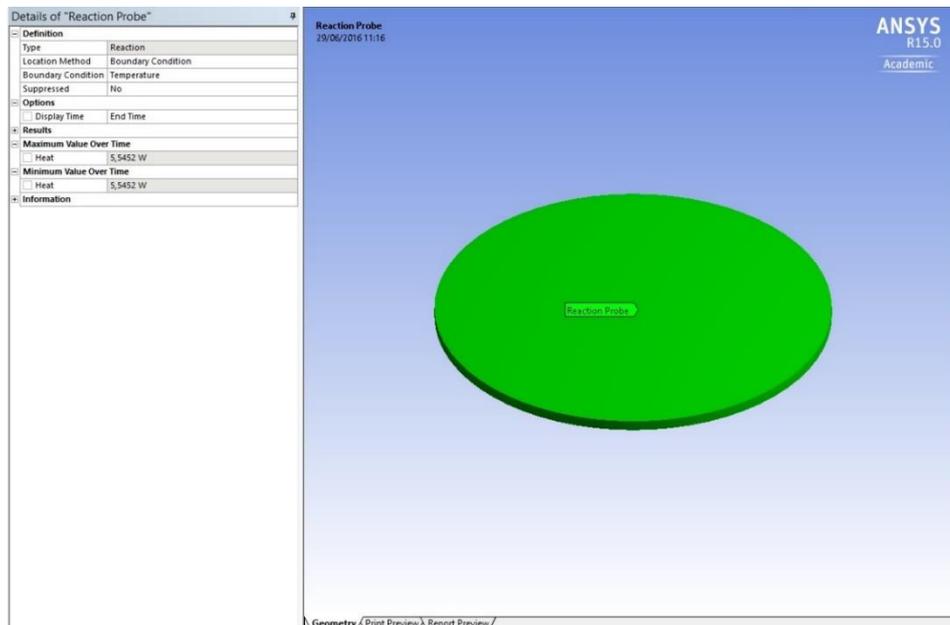


Captura 11. Radiación en la tapa media de vacío (Fuente propia)

$$Q_2 = -3,598 \text{ W}$$

5.2.4.3. Ventana frontal de mylar

Potencia térmica transferida por radiación por la ventana frontal de mylar:



Captura 12. Radiación en la ventana frontal de mylar (Fuente propia)

$$Q_3 = -5,545 \text{ W}$$

6. Conclusiones

En el presente apartado se recogen los valores globales de los efectos térmicos de la conducción y la radiación en el instrumento. Se expondrá una comparativa de los valores analíticos frente a los valores computacionales para determinar cuan precisos son los resultados.

6.1. Potencia térmica total a extraer

Según las consideraciones establecidas y en base a los valores analíticos obtenidos en el apartado 4, los valores globales de los efectos térmicos de la conducción y la radiación en el instrumento son los siguientes:

- Potencia térmica total debida a la transferencia de calor por conducción:

$$Q_{COND} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = -1,517 \text{ W}$$

- Potencia térmica total debida a la transferencia de calor por radiación:

$$Q_{RAD} = Q_{FAT} + Q_{SLIM} + Q_{CONE} + Q_{TAPA_1} + Q_{TAPA_2} + Q_{VENTANA} = -56,242 W$$

- Potencia térmica total que es necesario extraer del interior del instrumento para mantener las temperaturas deseadas:

$$Q_{TOTAL} = Q_{COND} + Q_{RAD} = -57,759 W$$

6.2. Comparación de los valores analíticos frente a los computacionales

A continuación se presentan dos tablas con los valores analíticos y computacionales para los efectos de la conducción y la radiación respectivamente, con su correspondiente porcentaje de error por la diferencia entre ambos valores.

- Porcentaje de error por la diferencia entre los valores analíticos y computacionales de los efectos térmicos de la conducción:

		ANALITICO [W]	COMPUTACIONAL [W]	% error
VACÍO A PLATO OMT	Q1	0,22	0,22	0,04
PLATO 20 K A A PLATO 50 K	Q2	0,05	0,05	0,00
VACÍO A PLATO 50 K	Q3	1,24	1,24	0,00

Tabla 1. Comparación valores analíticos frente a computacionales 1 (Fuente propia)

- Porcentaje de error por la diferencia entre los valores analíticos y computacionales de los efectos térmicos de la radiación:

		ANALITICO [W]	COMPUTACIONAL [W]	% error
SECCIÓN FAT	q1.3	0,0033	0,0037	9,73
	q3.2	14,71	14,69	0,15
SECCIÓN SLIM	q1.3	0,01	0,01	2,49
	q3.2	18,37	18,35	0,13
SECCIÓN CONE	q1.3	0,0029	0,0016	44,36
	q3.2	8,09	8,08	0,09
TAPA TRASERA DE VACÍO	Q1	5,91	5,90	0,13
TAPA MEDIA DE VACÍO	Q2	3,60	3,60	0,12
VENTANA FRONTAL DE MYLAR	Q3	5,55	5,55	0,12

Tabla 2. Comparación valores analíticos frente a computacionales 2 (Fuente propia)

En conducción, como se puede observar en los porcentajes, para los efectos de la conducción los valores son prácticamente iguales. Para la radiación, aunque los valores de porcentaje sean un poco mayores, siguen estando dentro de un rango aceptable. En el caso del primer valor de la sección FAT, la diferencia tiene que deberse a un error del programa que no se pudo identificar.

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Anexo II. Estudio de vacío

PROYECTO FINAL DE GRADO

TÍTULO

**DISEÑO DEL PROTOTIPO DEL INSTRUMENTO CRIOGÉNICO MFIS
(MULTY FREQUENCY INSTRUMENT SOUTH) DEL EXPERIMENTO
QUIJOTE**

AUTOR

Adrián Lorenzo Rodríguez

Índice Anexo II. Estudio de vacío

1. Introducción	3
2. Hipótesis de carga	3
3. Materiales	4
4. Cálculos computacionales de las secciones	5
4.1. Tensiones y deformaciones	5
4.1.1. Sección FRONT	6
4.1.2. Sección ECCEN	7
4.1.3. Sección BACK	7
4.1.4. Sección CONE	8
4.1.5. Sección SLIM	8
4.1.6. Sección FAT	9
5. Cálculos analíticos de las secciones	9
5.1. Hipótesis consideradas	9
5.2. Resultados obtenidos	11
5.2.1. Sección CONE	11
5.2.2. Sección SLIM	12
5.2.3. Sección FAT	13
6. Estudio con variación de los espesores	14
7. Estudio de pandeo	17
8. Conclusiones	19

1. Introducción

En el presente anexo se exponen los resultados de tensión y deformación obtenidos al someter la estructura de vacío del instrumento a una diferencia de presión igual a la presión atmosférica, con el objetivo de identificar, de forma general, los elementos críticos bajo las hipótesis de carga consideradas, tanto de forma computacional como de forma analítica. Obtenidos los valores para las dimensiones supuestas, se variarán los espesores de la estructura de vacío con el fin de observar cómo afecta esto a los valores de tensión y deformación.

2. Hipótesis de carga

Para el presente estudio se ha modelado la estructura de vacío de forma simplificada, respetando las dimensiones generales, pero sin considerar detalles constructivos como orificios o uniones. Se han nombrado las diferentes secciones de la siguiente forma para poder hacer referencia a ellas:

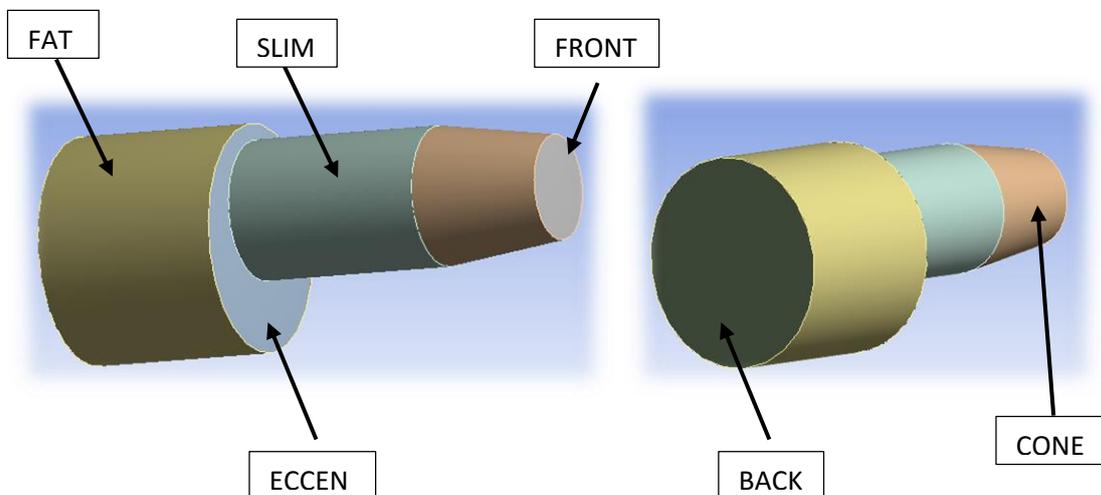


Figura 42. Esquema estructura de vacío (Fuente propia)

Para reducir los tiempos de procesamiento del programa, se ha optado por simplificar las secciones a elementos tipo “shell”, es decir, elementos de superficie en vez de elementos sólidos, pero asignándoles un valor de espesor determinado.

Para fijar la pieza en el entorno de simulación, se han restringido los desplazamientos en los tres ejes del aro superior de la sección FAT:

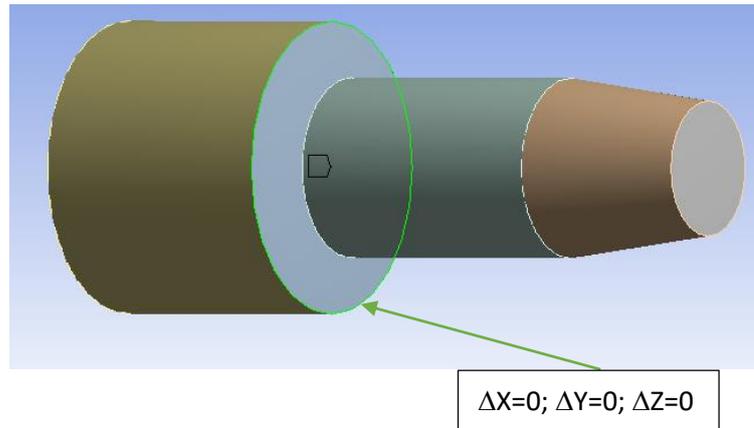


Figura 43. Restricción de los desplazamientos (Fuente propia)

Dado que el recipiente en su interior se someterá a un nivel de vacío del orden de 10^{-6} mbar, el nivel de presión que este ha de soportar es la presión atmosférica, ejercida de forma perpendicular en toda la superficie externa de la estructura de vacío. Valor de presión considerado: 1 atm (10^5 Pa).

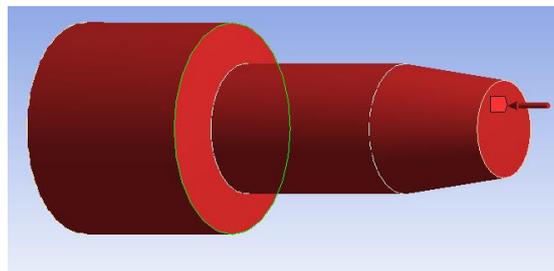


Figura 44. Consideración de la carga de presión (Fuente propia)

3. Materiales

La estructura de vacío se fabricará en uno de los materiales ya mencionado anteriormente en el anexo I de este proyecto, la aleación de aluminio 6082 T6. A continuación se presentan unas tablas con las principales propiedades físicas y mecánicas de este material:

Propiedades mecánicas a 295 K				
Carga de rotura N/mm ²	Límite elástico N/mm ²	Límite a la fatiga N/mm ²	Resistencia a la cizalladura N/mm ²	Dureza Brinell HB
340	310	210	210	95

Tabla 3. Propiedades mecánicas aluminio 6082 T6 (Fuente propia)

Propiedades físicas a 295 K				
Módulo elástico N/mm ²	Peso específico g/cm ³	Intervalo de fusión K	Coefficiente de dilatación lineal 1/10 ⁶ K	Conductividad térmica W/mK
70000	2,71	848-923	23,1	172

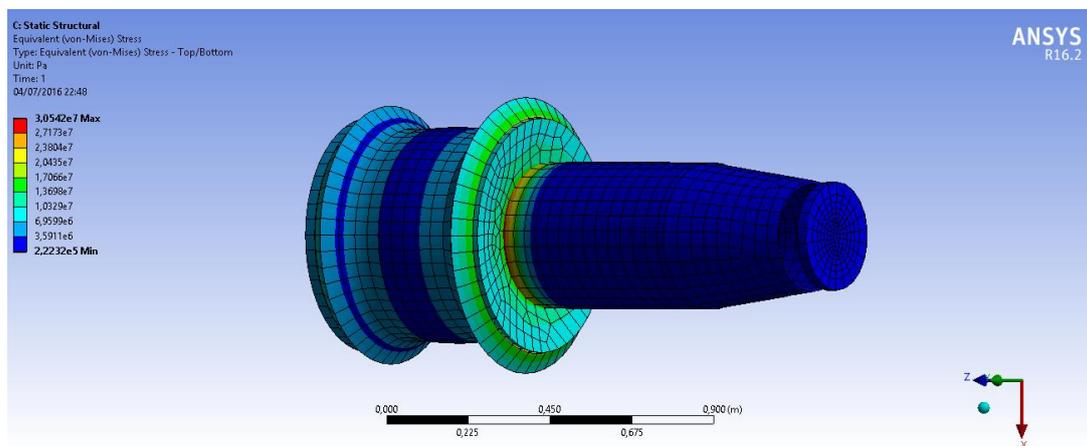
Tabla 4. Propiedades físicas aluminio 6082 T6 (Fuente propia)

4. Cálculos computacionales de las secciones

A continuación, se presentarán capturas de pantalla con los resultados obtenidos del programa ANSYS para los valores de tensión y deformación de la estructura de vacío, indicando, tanto en general como para cada sección, los valores máximos de estas magnitudes. Se ha realizado por medio de un estudio estructural estático.

4.1. Tensiones y deformaciones

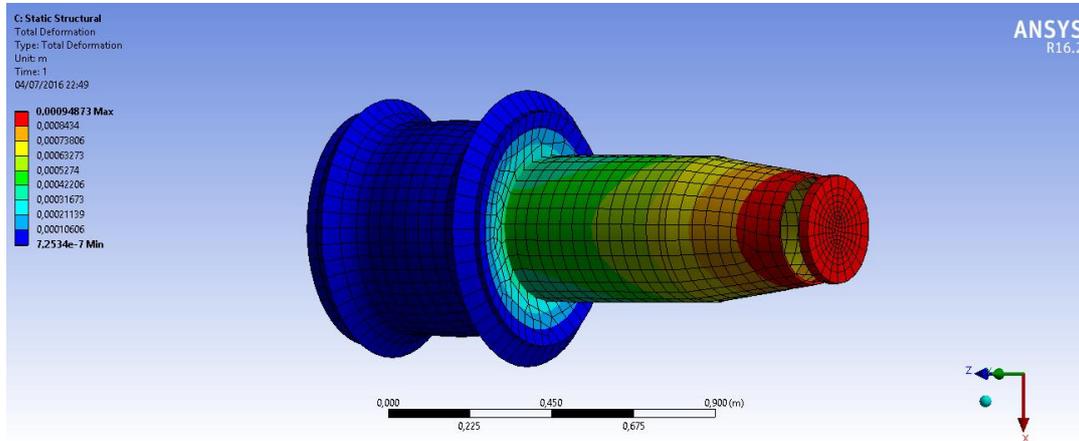
Valores de tensión obtenidos en la simulación para la estructura de vacío general:



Captura 13. Valores de tensión en la estructura de vacío (Fuente propia)

Tensión máxima → 30,54 MPa

Valores de deformación obtenidos en la simulación para la estructura de vacío general:

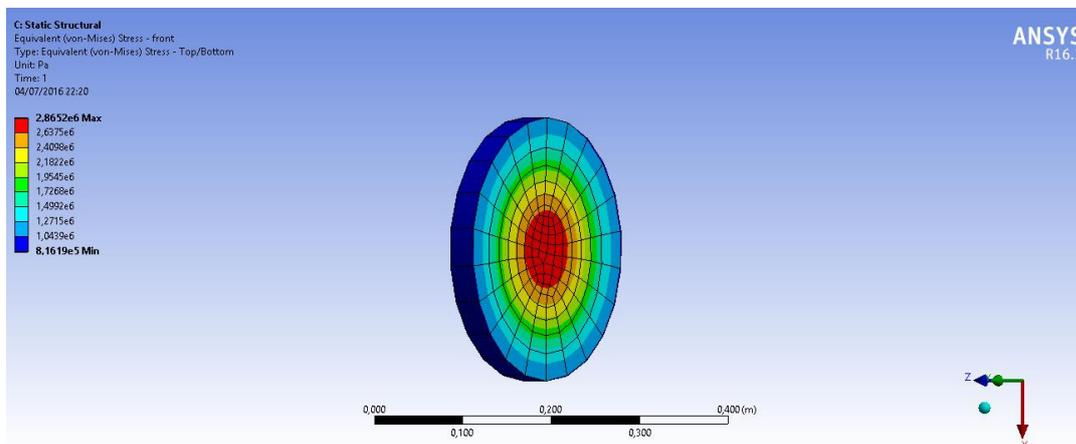


Captura 14. Valores de deformación en la estructura de vacío (Fuente propia)

Deformación máxima \rightarrow 0,95 mm

4.1.1. Sección FRONT

Valores de tensión y deformación obtenidos en la simulación para la sección FRONT:



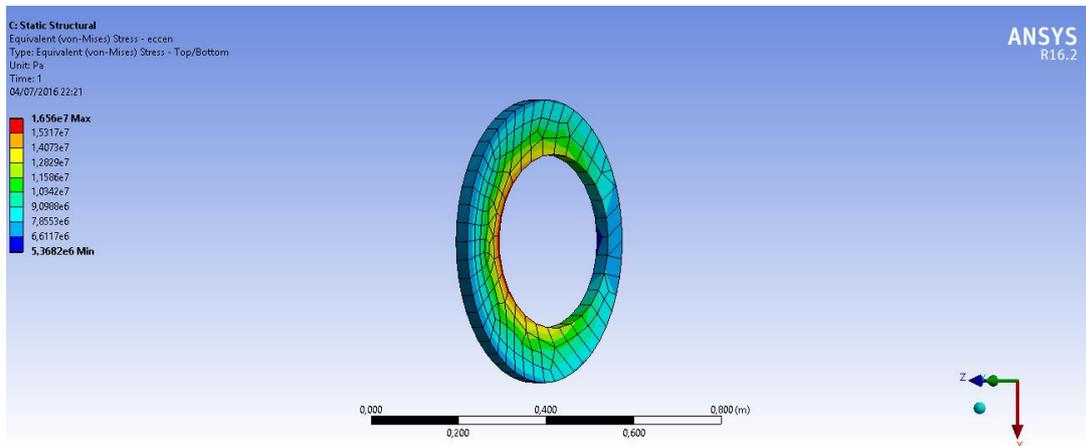
Captura 15. Valores de tensión de la sección FRONT (Fuente propia)

Tensión máxima \rightarrow 2,86 MPa

Deformación máxima \rightarrow 0,95 mm

4.1.2. Sección ECCEN

Valores de tensión y deformación obtenidos en la simulación para la sección ECCEN:



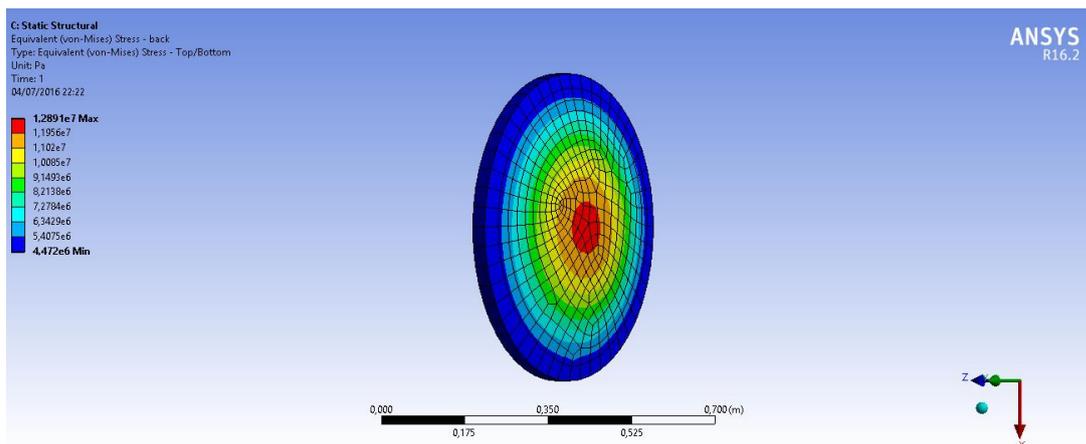
Captura 16. Valores de tensión de la sección ECCEN (Fuente propia)

Tensión máxima \rightarrow 16,56 MPa

Deformación máxima \rightarrow 0,42 mm

4.1.3. Sección BACK

Valores de tensión y deformación obtenidos en la simulación para la sección BACK:



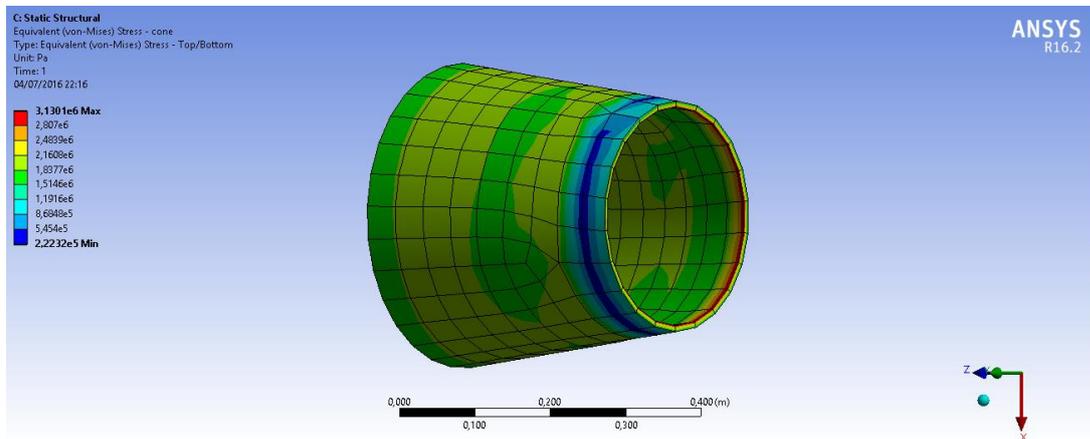
Captura 17. Valores de tensión de la sección BACK (Fuente propia)

Tensión máxima \rightarrow 12,89 MPa

Deformación máxima \rightarrow 0,32 mm

4.1.4. Sección CONE

Valores de tensión y deformación obtenidos en la simulación para la sección CONE:



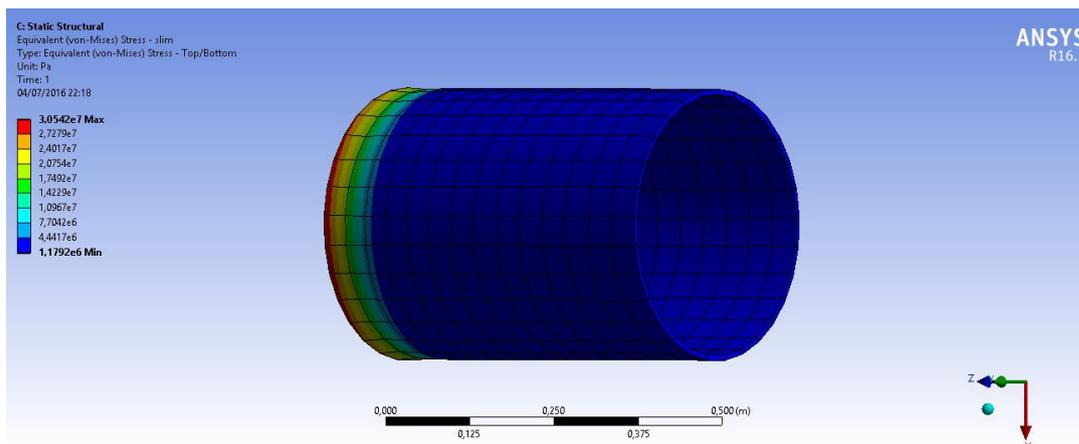
Captura 18. Valores de tensión de la sección CONE (Fuente propia)

Tensión máxima $\rightarrow 3,13 \text{ MPa}$

Deformación máxima $\rightarrow 0,95 \text{ mm}$

4.1.5. Sección SLIM

Valores de tensión y deformación obtenidos en la simulación para la sección SLIM:



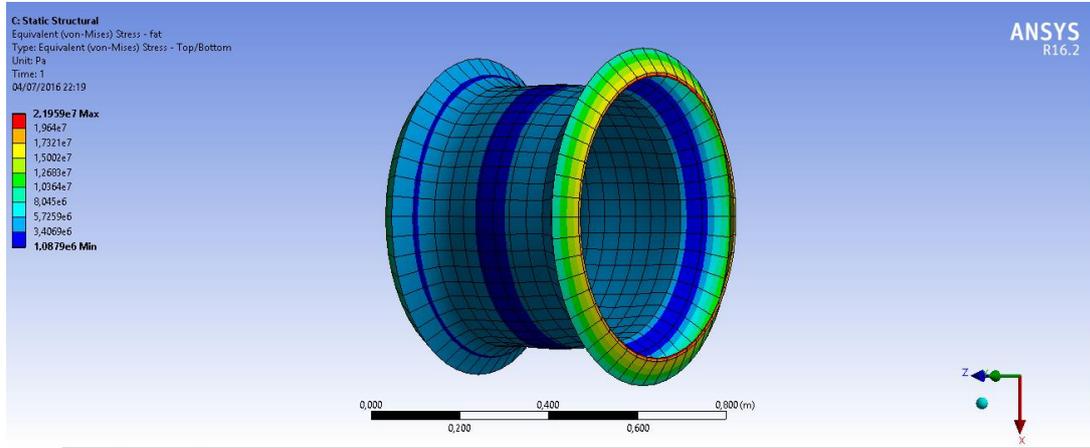
Captura 19. Valores de tensión de la sección SLIM (Fuente propia)

Tensión máxima $\rightarrow 30,54 \text{ MPa}$

Deformación máxima $\rightarrow 0,63 \text{ mm}$

4.1.6. Sección FAT

Valores de tensión y deformación obtenidos en la simulación para la sección FAT:



Captura 20. Valores de tensión de la sección FAT (Fuente propia)

Tensión máxima → 21,96 MPa

Deformación máxima → 0 mm

5. Cálculos analíticos de las secciones

En este apartado se calculará, de forma analítica y aproximada, los valores de tensión equivalentes correspondientes a las diferentes secciones de la estructura de vacío, para poder compararlos así con los valores computacionales y determinar cuan parecidos son.

5.1. Hipótesis consideradas

Se tomará el caso de estudio como una envolvente de revolución de pared delgada, por lo que se aplicará la teoría de membrana, en la que se considera que no hay ni esfuerzos cortantes ni momentos en ningún punto de la envolvente. Por tanto, todos los esfuerzos que se producen son normales. Por otra parte, se considera un reparto uniforme de tensiones en todo el espesor de la envolvente.

Partiendo de la ecuación de Laplace para un elemento aislado del recipiente de espesor “e”, sometido a una presión “p” y limitado por dos planos meridianos y por dos secciones normales a las líneas meridianas:

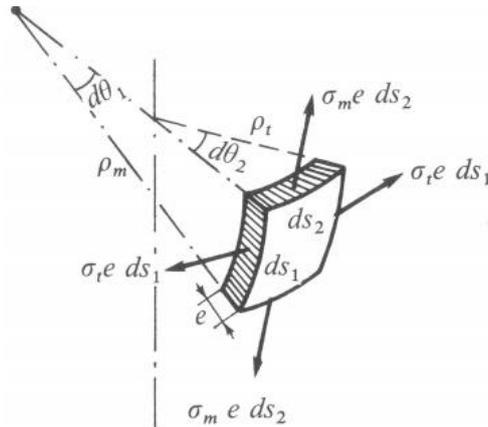


Figura 45. Elemento aislado de un recipiente a presión (Fuente pública)

$$\frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_t}{\rho_t} = \frac{p}{e} \quad \text{Ecuación 5. Ecuación de Laplace}$$

- $\sigma_m \rightarrow$ Tensión en la dirección del meridiano
- $\sigma_t \rightarrow$ Tensión en la dirección normal a la sección meridiana
- $\rho_m \rightarrow$ Radio de curvatura del meridiano de la superficie media
- $\rho_t \rightarrow$ Radio de curvatura de la sección normal perpendicular al meridiano

Y con las correspondientes simplificaciones derivadas de la consideración de recipiente de pared delgada, obtenemos la ecuación para la tensión equivalente de Von Misses como:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_m^2 - \sigma_t \cdot \sigma_m} \quad \text{Ecuación 6. Tensión equivalente de Von Misses}$$

Para un recipiente cilíndrico sometido a presión interna:

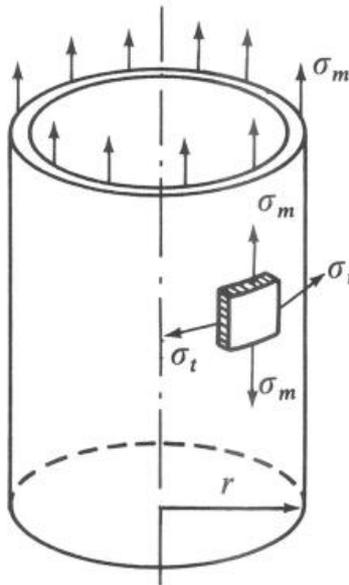


Figura 46. Recipiente cilíndrico (Fuente pública)

Los valores de “ σ_m ” y “ σ_t ” quedan como:

$$\rho_m = \infty \quad \rho_t = r$$

$$\sigma_t = \frac{p \cdot r}{e} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$\sigma_m = \frac{p \cdot r}{2e} \quad \text{Ecuación 8}$$

5.2. Resultados obtenidos

A continuación, se calcularán los valores de tensión equivalentes para cada una de las secciones cilíndricas definidas en el apartado dos de este anexo y se compararán con los valores computacionales ya obtenidos.

Hay que tener en cuenta que los valores analíticos están calculados considerando una tensión uniforme en todo el cilindro, lo cual en la realidad no es así. En el método computacional, estos valores se corresponden con los valores de tensión equivalente en la altura media del cilindro.

5.2.1. Sección CONE

Valor analítico de tensión equivalente de Von Mises según la ecuación 6 para la sección CONE de la estructura de vacío (se considera forma cilíndrica con diámetro el diámetro medio del cono):

DATOS:

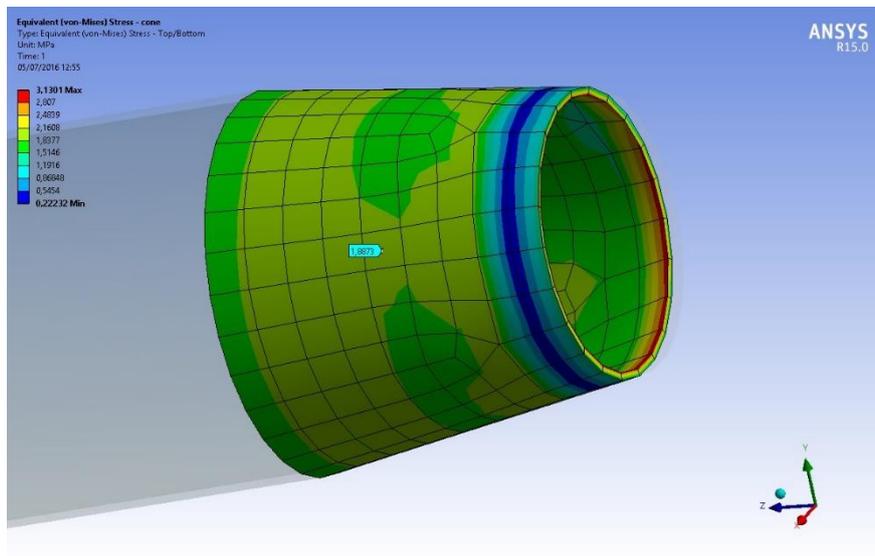
$$p = -1 \text{ atm} \quad r_c = 125 \text{ mm} \quad e = 8 \text{ mm}$$

TENSIÓN EQUIVALENTE:

$$\sigma_{tc} = \frac{p \cdot r}{e} = -1,58 \text{ MPa} \quad \sigma_{mc} = \frac{p \cdot r}{2e} = -0,79 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{eqC} = \sqrt{\sigma_{tc}^2 + \sigma_{mc}^2 - \sigma_{tc} \cdot \sigma_{mc}} = 1,37 \text{ MPa}$$

Valor computacional de la tensión equivalente de Von Mises a la altura media del cilindro para la sección CONE de la estructura de vacío:



Captura 21. Valor tensión equivalente en la altura media de la sección CONE (Fuente propia)

$$\sigma_{eqC} = 1,89 \text{ MPa}$$

5.2.2. Sección SLIM

Valor analítico de tensión equivalente de Von Mises según la ecuación 6 para la sección SLIM de la estructura de vacío:

DATOS:

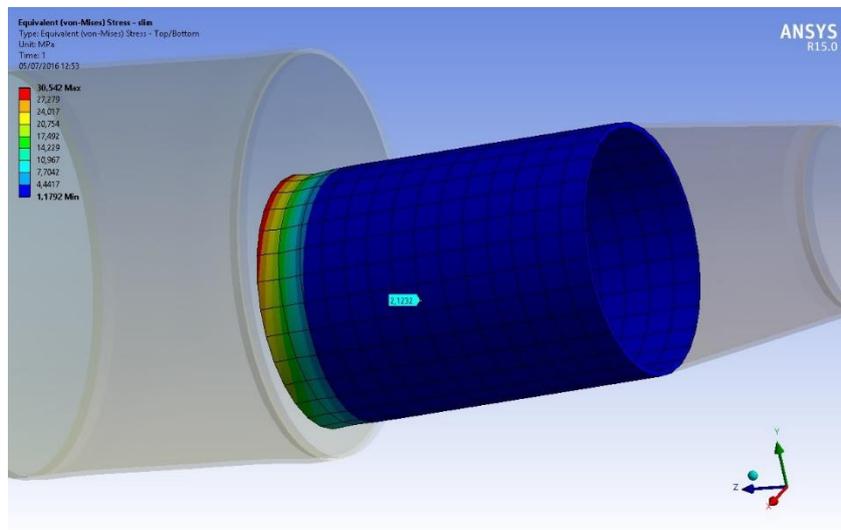
$$p = -1 \text{ atm} \quad r_s = 200 \text{ mm} \quad e = 8 \text{ mm}$$

TENSIÓN EQUIVALENTE:

$$\sigma_{ts} = \frac{p \cdot r}{e} = -2,53 \text{ MPa} \quad \sigma_{ms} = \frac{p \cdot r}{2e} = -1,27 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{eqS} = \sqrt{\sigma_{ts}^2 + \sigma_{ms}^2 - \sigma_{ts} \cdot \sigma_{ms}} = 2,19 \text{ MPa}$$

Valor computacional de la tensión equivalente de Von Misses a la altura media del cilindro para la sección SLIM de la estructura de vacío:



Captura 22. Valor tensión equivalente en la altura media de la sección SLIM (Fuente propia)

$$\sigma_{eqS} = 2,12 \text{ MPa}$$

5.2.3. Sección FAT

Valor analítico de tensión equivalente de Von Misses según la ecuación 6 para la sección FAT de la estructura de vacío:

DATOS:

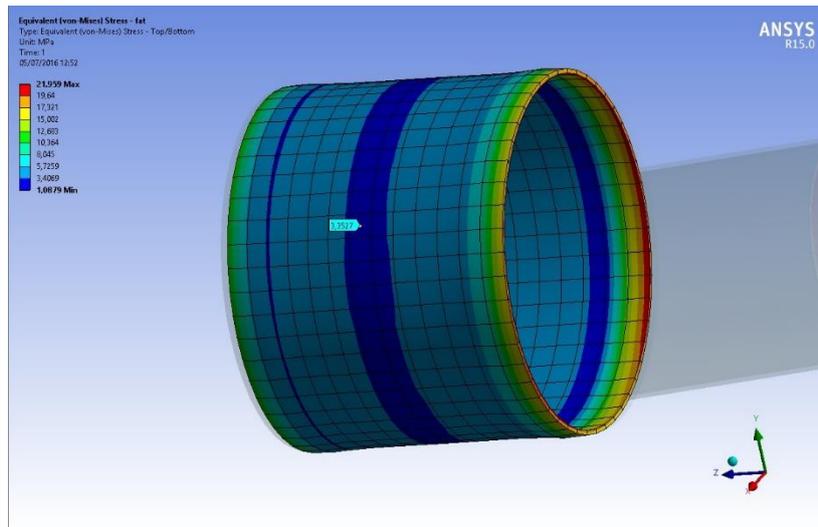
$$p = -1 \text{ atm} \quad r_F = 325 \text{ mm} \quad e = 8 \text{ mm}$$

TENSIÓN EQUIVALENTE:

$$\sigma_{tF} = \frac{p \cdot r}{e} = -4,12 \text{ MPa} \quad \sigma_{mF} = \frac{p \cdot r}{2e} = -2,06 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{eqF} = \sqrt{\sigma_{tF}^2 + \sigma_{mF}^2 - \sigma_{tF} \cdot \sigma_{mF}} = 3,57 \text{ MPa}$$

Valor computacional de la tensión equivalente de Von Misses a la altura media del cilindro para la sección FAT de la estructura de vacío:



Captura 23. Valor tensión equivalente en la altura media de la sección FAT (Fuente propia)

$$\sigma_{eqF} = 3,35 \text{ MPa}$$

6. Estudio con variación de los espesores

Dado que las dimensiones de la estructura de vacío, en lo que a espesores de las paredes y grosor de las tapas se refiere, se determinaron orientativamente, se ha realizado un estudio partiendo del modelo expuesto en el apartado cuatro de este anexo y reduciendo dichas medidas para ver cómo afecta a los valores de tensión y deformación. Los valores se obtenidos se representarán en tablas identificando tanto la dimensión de la sección como los valores máximos de tensión y deformación.

En primer lugar, presentamos una tabla con los valores correspondientes al ensayo inicial que se expuso en el apartado cuatro de este anexo:

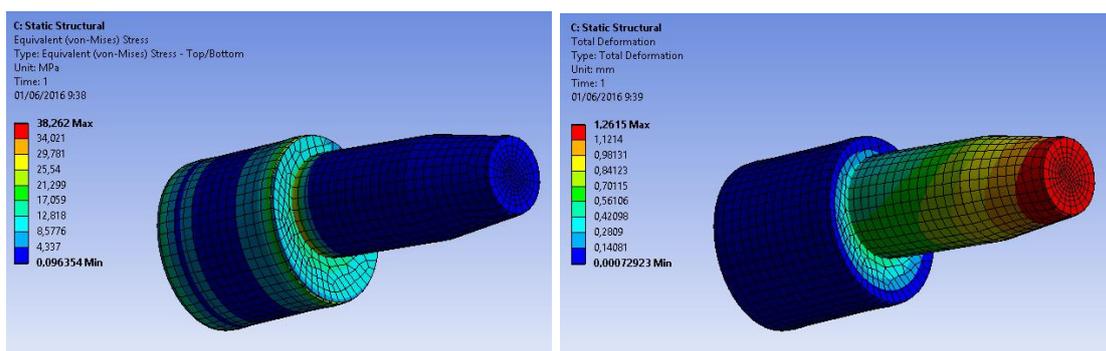
PIEZA	ESPESOR [mm]	TENSIÓN MAX [MPa]	DESPLAZ. MAX [mm]
FRONT	30	2,86	0,95
ECCEN	30	16,56	0,42
BACK	30	12,89	0,32
CONE	8	3,13	0,95
SLIM	8	30,54	0,63
FAT	8	21,96	0

Tabla 5. Valores iniciales tensión y deformación (Fuente propia)

Estudio reduciendo las tapas FRONT, ECCEN y BACK a 25 mm de grosor:

PIEZA	ESPESOR [mm]	TENSIÓN MAX [MPa]	DESPLAZ. MAX [mm]
FRONT	25	3,93	1,26
ECCEN	25	17,86	0,56
BACK	25	17,43	0,42
CONE	8	3,96	1,26
SLIM	8	38,26	0,84
FAT	8	26,42	0

Tabla 6. Tensión y deformación reducción 1 (Fuente propia)

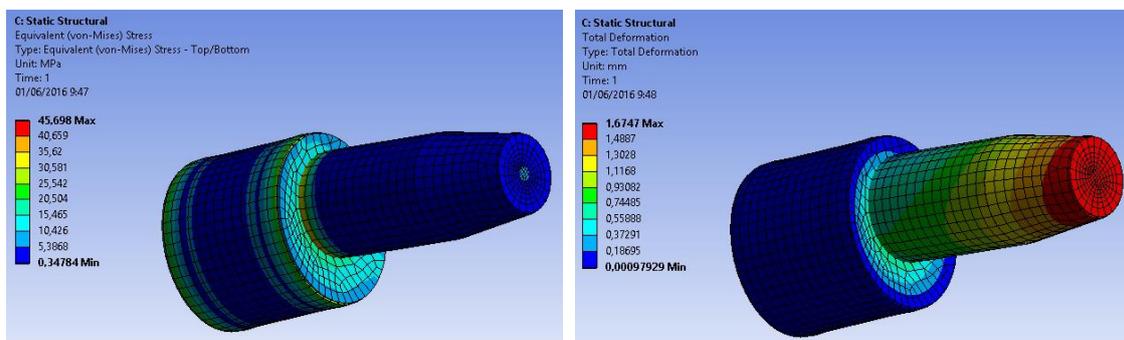


Captura 24. Tensión y deformación reducción 1 (Fuente propia)

Estudio reduciendo las tapas FRONT, ECCEN y BACK a 20 mm de grosor:

PIEZA	ESPESOR [mm]	TENSIÓN MAX [MPa]	DESPLAZ. MAX [mm]
FRONT	20	5,64	1,68
ECCEN	20	19,39	0,75
BACK	20	24,45	0,56
CONE	8	5,37	1,68
SLIM	8	45,7	1,12
FAT	8	31,54	0

Tabla 7. Tensión y deformación reducción 2 (Fuente propia)

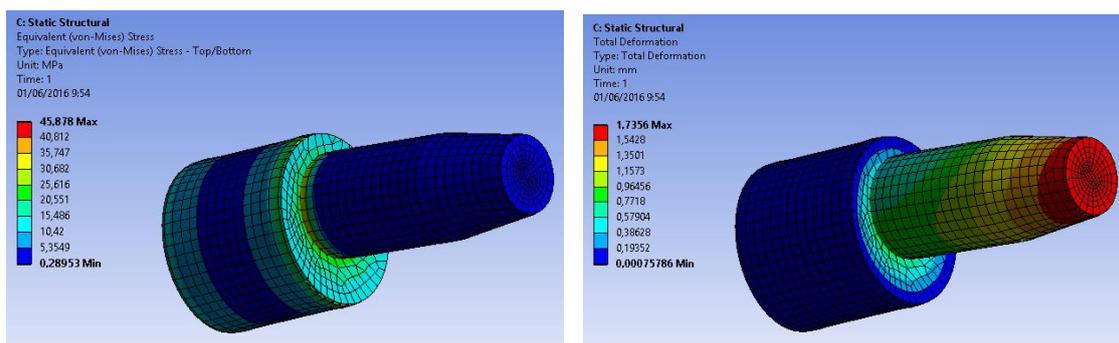


Captura 25. Tensión y deformación reducción 2 (Fuente propia)

Estudio reduciendo las tapas FRONT, ECCEN y BACK a 25 mm de grosor y las secciones CONE, SLIM y FAT a 6 mm de espesor:

PIEZA	ESPESOR [mm]	TENSIÓN MAX [MPa]	DESPLAZ. MAX [mm]
FRONT	25	4,18	1,74
ECCEN	25	25,64	0,77
BACK	25	18,87	0,58
CONE	6	4,22	1,74
SLIM	6	45,88	1,16
FAT	6	32,58	0

Tabla 8. Tensión y deformación reducción 3 (Fuente propia)

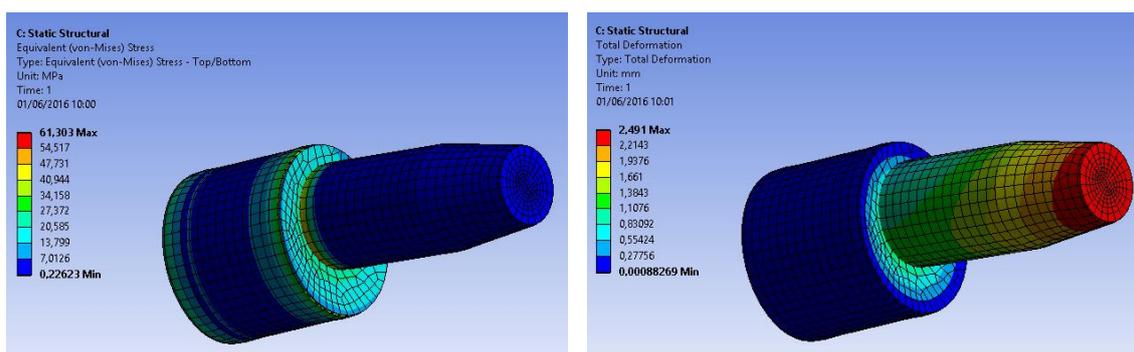


Captura 26. Tensión y deformación reducción 3 (Fuente propia)

Estudio reduciendo las tapas FRONT, ECCEN y BACK a 20 mm de grosor y las secciones CONE, SLIM y FAT a 6 mm de espesor:

PIEZA	ESPESOR [mm]	TENSIÓN MAX [MPa]	DESPLAZ. MAX [mm]
FRONT	20	6,17	2,49
ECCEN	20	28,38	1,66
BACK	20	27,41	0,83
CONE	6	5,81	2,49
SLIM	6	61,3	1,38
FAT	6	41,65	0

Tabla 9. Tensión y deformación reducción 4 (Fuente propia)



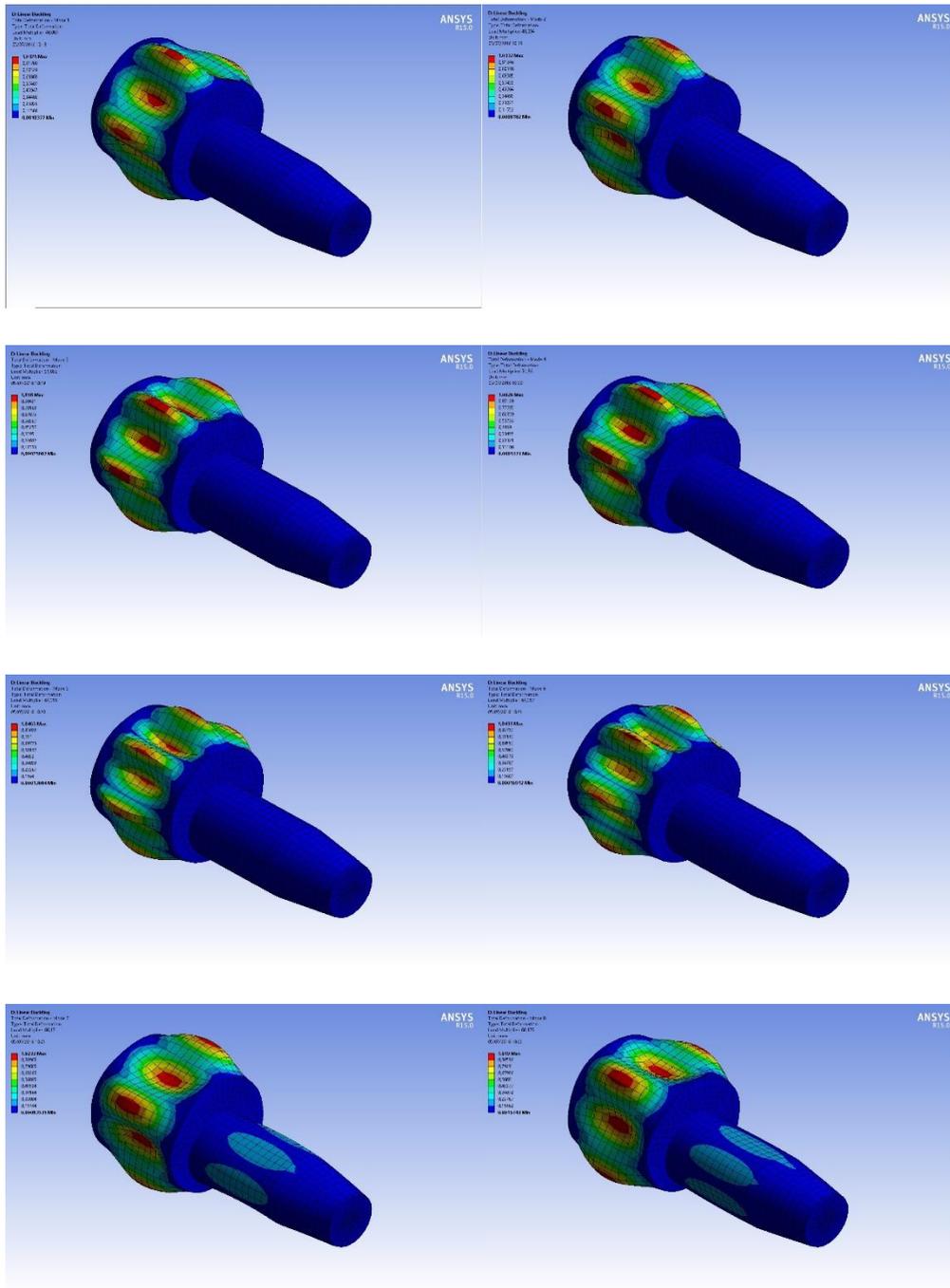
Captura 27. Tensión y deformación reducción 4 (Fuente propia)

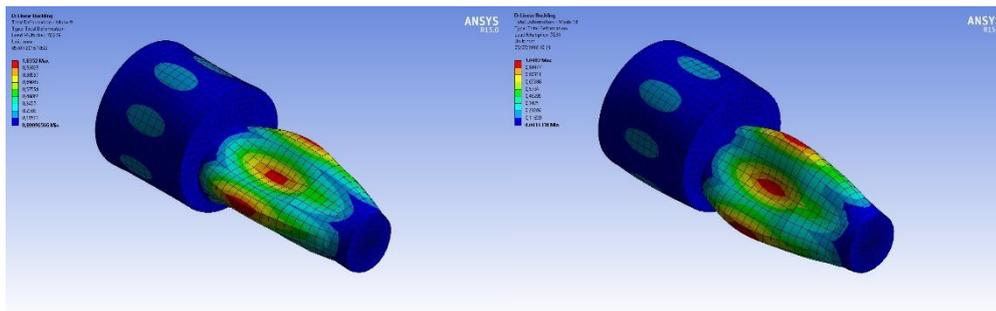
7. Estudio de pandeo

Un aspecto importante a tener en cuenta debido a la esbeltez de las paredes de la carcasa de vacío es el fenómeno de pandeo. Partiendo del mismo modelo del apartado

cuatro de este anexo, se ha realizado un estudio estático de pandeo, obteniendo los resultados para los primeros 10 modos de pandeo del modelo.

A continuación, se muestran capturas de pantalla con los resultados obtenidos a partir de la simulación en el programa ANSYS:





Captura 28. Primeros 10 modos de pandeo (Fuente propia)

El programa proporciona unos coeficientes de carga, los cuales indican por qué valor hay que multiplicar el esfuerzo establecido en la simulación para que se produzca un fallo por pandeo en el modelo. Dichos coeficientes quedan recogidos en la siguiente tabla para cada modo de pandeo:

MODO DE PANDEO	COEFICIENTES DE CARGA
1	48,09
2	48,09
3	51,86
4	51,86
5	64,36
6	64,36
7	66,17
8	66,18
9	70,28
10	70,31

Tabla 10. Coeficientes de carga para los modos de pandeo (Fuente propia)

8. Conclusiones

Siendo muy conservadores y tomando como valor de tensión admisible de la aleación de aluminio la mitad de su límite elástico, $\sigma_{adm}=155$ MPa, estamos muy por debajo de este valor incluso en el caso más desfavorable con menores espesores, $\sigma_{m\acute{a}x}=61,3$ MPa. Sin embargo, los valores de deformación si son más críticos, ya que para un receptor de ondas infrarrojas un desplazamiento de casi 2,5 mm es inadmisibles. En base a la limitación de desplazamiento con respecto a las deformaciones que se defina, la

cual aún no ha sido impuesta, se determinarán los valores de espesores finales de la estructura de vacío.

Con respecto al pandeo también nos encontramos muy a favor del lado de la seguridad ya que, en el peor de los casos, el modo 1 de pandeo, habría que aumentar la presión hasta casi 50 atm para que la estructura fallara por este fenómeno. En el estudio de la reducción de espesores, el menor coeficiente de carga que se obtuvo fue del orden de 10, manteniéndose aun del lado de la seguridad.

A continuación se mostrará una tabla comparativa entre los valores computacionales y analíticos obtenidos para las secciones cilíndricas FAT, SLIM y CONE con sus correspondientes porcentajes de error:

SECCIÓN	COMPUTACIONAL [MPa]	ANALÍTICO [MPa]	% error
CONE	1,89	1,37	27,5
SLIM	2,12	2,19	3,2
FAT	3,53	3,57	1,12

Tabla 11. Comparativa valores computacionales y analíticos de tensión (Fuente propia)

Como se puede observar en la tabla, los valores computacionales y analíticos son prácticamente idénticos. El error en la sección CONE se debe al haber considerado la simplificación de cono a cilindro, no obstante, esta simplificación no genera un error excesivamente alto para la magnitud de valores que se están tratando.

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y
TECNOLOGÍA**
GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

**Anexo III. Árbol de producto y
planos**

PROYECTO FINAL DE GRADO

TÍTULO

**DISEÑO DEL PROTOTIPO DEL INSTRUMENTO CRIOGÉNICO MFIS
(MULTY FREQUENCY INSTRUMENT SOUTH) DEL EXPERIMENTO
QUIJOTE**

AUTOR

Adrián Lorenzo Rodríguez

Índice Anexo III. Árbol de producto y planos

1. Introducción.....	4
2. Árbol de producto	5
3. Planos	6
3.1. Criostato.....	6
3.2. Sección criostato	7
3.3. Varilla 20x399	8
3.4. Varilla 20x390	9
3.5. Tapa vacío receptor.....	10
3.6. Tapa vacío frontal	11
3.7. Tapa vacío 2.....	12
3.8. Tapa vacío	13
3.9. Sección shields	14
3.10. Shield 50 K rectángulo.....	15
3.11. Shield 50 K cono	16
3.12. Shield 50 K cilindro.....	17
3.13. Shield 20 K cono	18
3.14. Shield 20 K cilindro.....	19
3.15. Pletina 30x350	20
3.16. Pletina 30x90	21
3.17. Pieza unión pletina	22
3.18. Envoltura vacío 2.....	23
3.19. Envoltura vacío 2 cono.....	24
3.20. Envoltura vacío 2 cilindro	25
3.21. Envoltura vacío 1.....	26
3.22. Cold plate 50 K.....	27
3.23. Cold plate 20 K.....	28
3.24. Base fría bocina 2	29
3.25. Base fría bocina 1	30
3.26. Aro vacío 4	31
3.27. Aro vacío 3	32
3.28. Aro vacío 2	33
3.29. Aro vacío 1	34

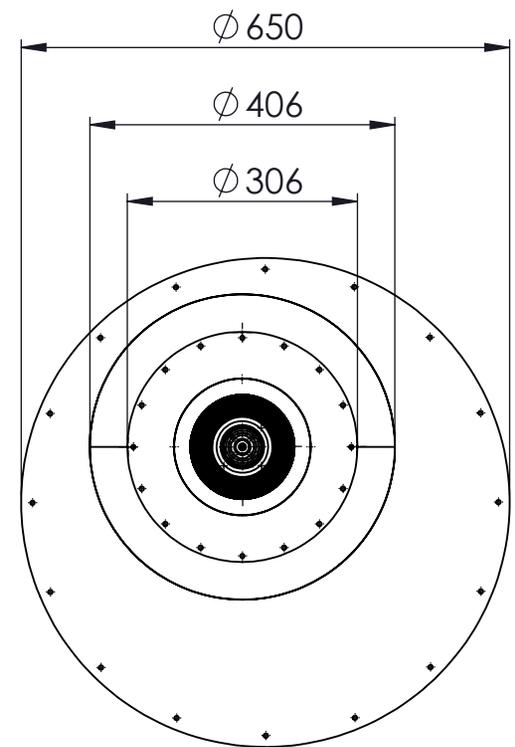
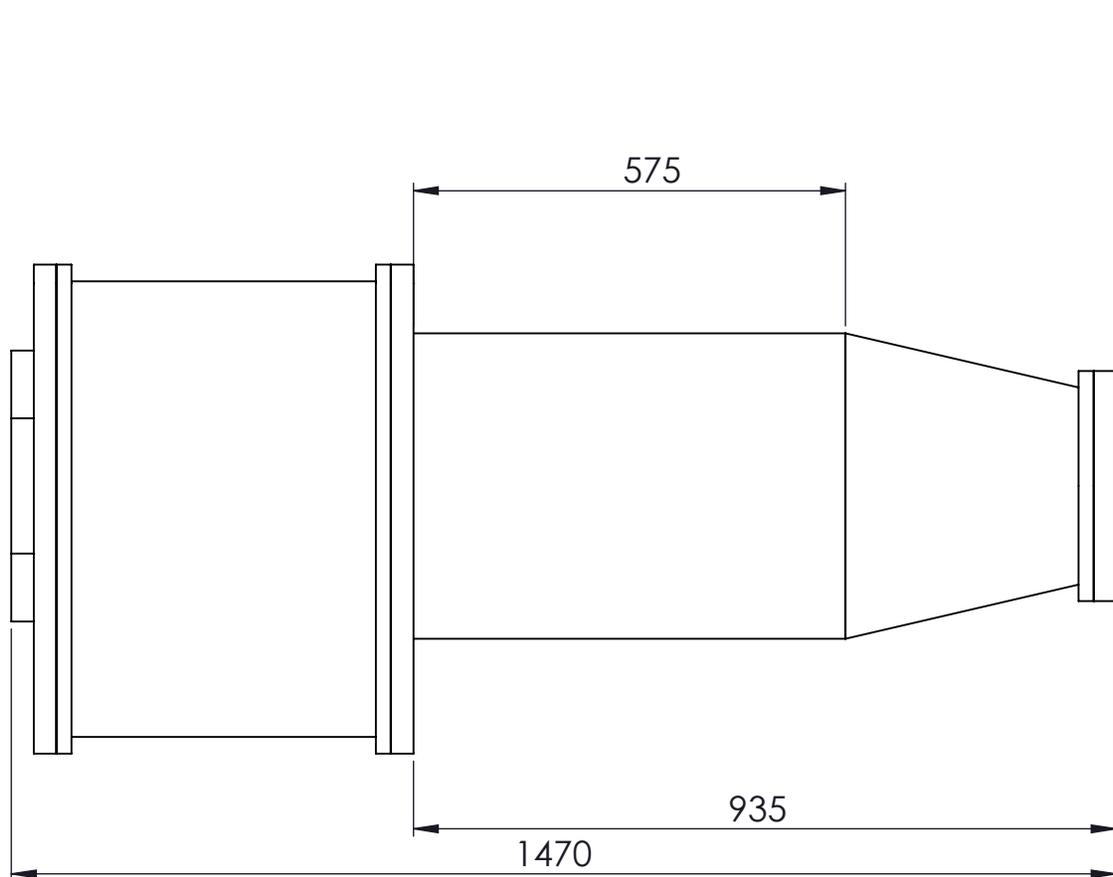
3.30.	Aro tapa shield 50 K.....	35
3.31.	Aro tapa shield 20 K.....	36
3.32.	Aro base shield 50 K.....	37
3.33.	Aro base shield 20 K.....	38

1. Introducción

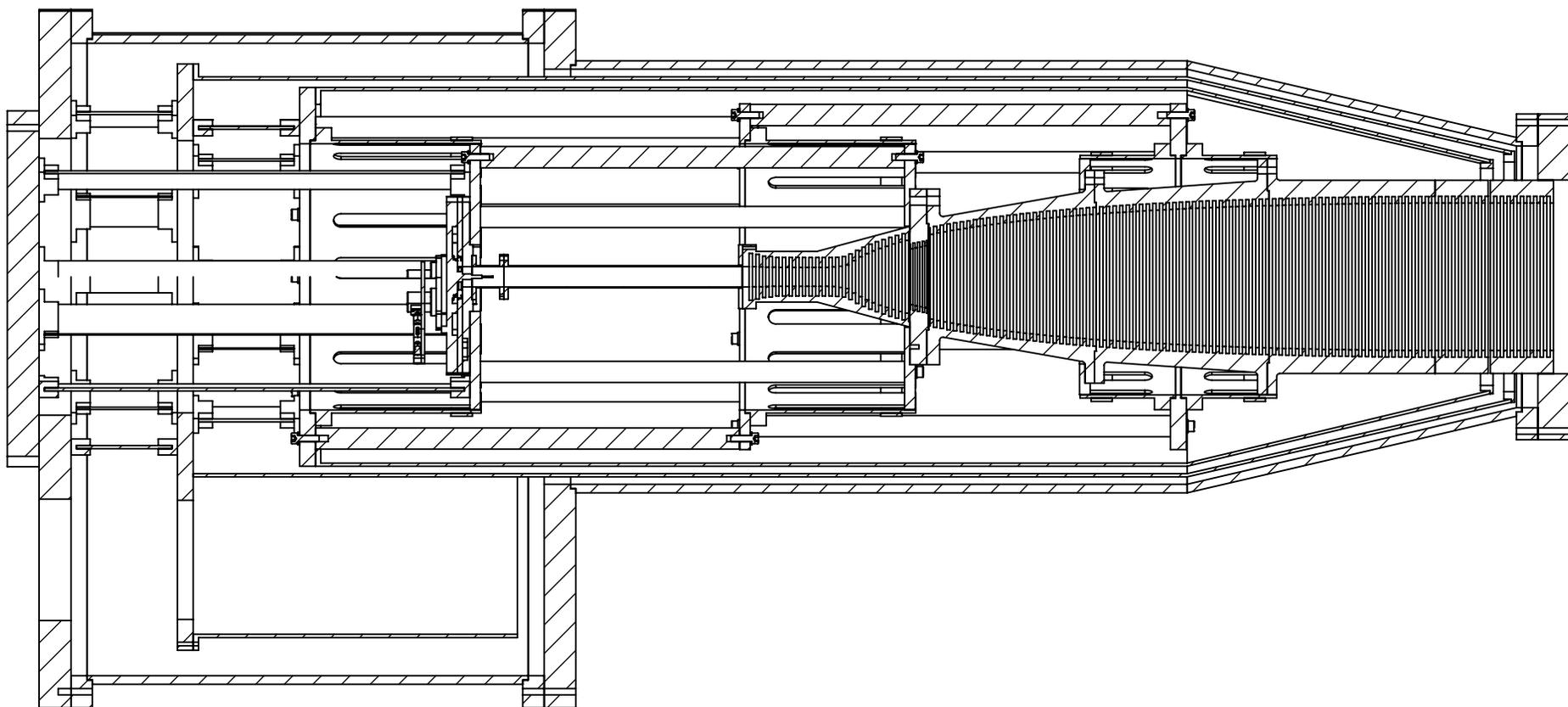
En el siguiente anexo se mostrará un árbol de producto del proyecto. En él se especificarán todos los componentes que se han nombrado con anterioridad, organizados por grupos y subgrupos según su aplicación, e incluyendo ciertas propiedades relevantes de los mismos.

Por último, se expondrán los planos realizados de todos los componentes que se han diseñado. Los planos se han elaborado únicamente con el objetivo de solicitar un presupuesto aproximado de subcontrata para la fabricación. Ya que no son planos definitivos de fabricación, no se han tenido en cuenta tolerancias ni acabados superficiales.

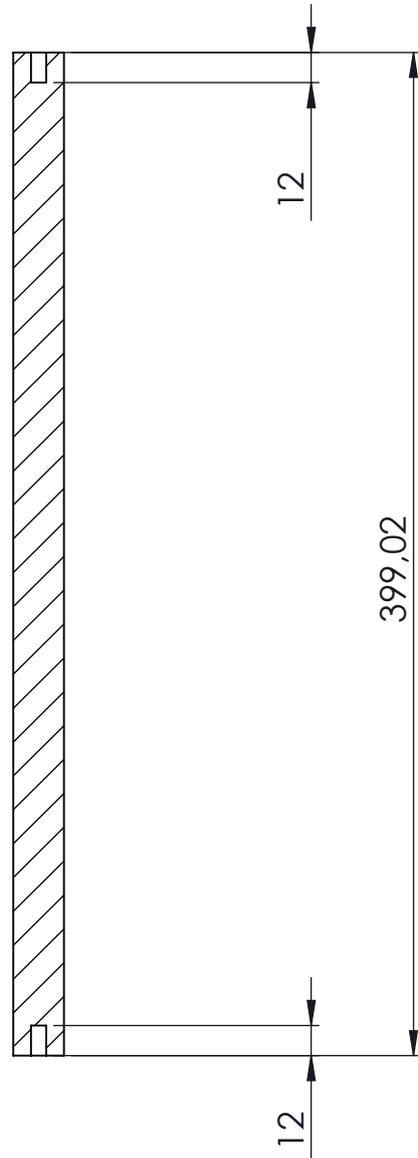
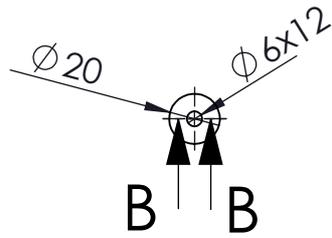
INTRUMENTO	CONJUNTO	SUBCONJUNTO 1	SUBCONJUNTO 2	SUBCONJUNTO 3	PIEZA	MATERIAL	DENSIDAD (kg/m3)	VOLUMEN (mm3)	PESO (kg)	Nº DE PIEZAS	VOLUMEN TOTAL (mm3)	PESO TOTAL (kg)	SUBTOTAL [kg]
													230,50
	ESTRUCTURA_RECEPTOR												24,03
		ESTRUCTURA_FRIA_RECEPTOR											15,03
					DISCO_CONTACTO_OMT	COBRE OFHC	8960	449818,8	4,03037645	1	449818,8	4,030376448	
					DISCO_CONTACTO_BOCINA_1	COBRE OFHC	8960	344813,4	3,08952806	1	344813,4	3,089528064	
					DISCO_CONTACTO_BOCINA_2	COBRE OFHC	8960	121966,7	1,09282163	1	121966,7	1,092821632	
					VARILLA_20_399	COBRE OFHC	8960	124676,3	1,11709965	6	748057,8	6,702597888	
					MONOPIEZA_LNAS	COBRE OFHC	8960	12880,57	0,11540991	1	12880,57	0,115409907	
		ESTRUCTURA_VACIO_RECEPTOR											7,48
					TAPA_VACIO_RECEPTOR	AL 6082 T6	2710	2511080	6,8050268	1	2511080	6,8050268	
					PIEZA_UNION_PLETINA	AL 6082 T6	2710	8683,65	0,02353269	12	104203,8	0,282392298	
					PLETINA_30_350	G10	1850	35573,4	0,06581079	6	213440,4	0,39486474	
		SECCION_BOCINA											1,52
					SECCION_BOCINA	AL 6082 T6	2710	559235,3	1,51552766	1	559235,3	1,515527663	
	CRIOSTATO												172,50
		ESTRUCTURA_FRIA_CRIOSTATO											80,43
			CONDUCCION_TERMICA										57,79
				BOCINA_1									10,66
					BASE_FRIA_BOCINA_1	COBRE OFHC	8960	639153,1	5,72681178	1	639153,1	5,726811776	
					PINZA_BOCINA_1	COBRE OFHC	8960	264439,7	2,36937971	2	528879,4	4,738759424	
					ARO_TEFLON_BOCINA_1	TEFLON	2200	43542,47	0,09579343	2	87084,94	0,191586868	
				BOCINA_2									6,84
					BASE_FRIA_BOCINA_2	COBRE OFHC	8960	321262,7	2,87851379	1	321262,7	2,878513792	
					PINZA_BOCINA_2	COBRE OFHC	8960	429928,7	3,85216115	1	429928,7	3,852161152	
					ARO_TEFLON_BOCINA_2	TEFLON	2200	48867,47	0,10750843	1	48867,47	0,107508434	
				COLD_PLATE_20K									10,48
					COLD_PLATE_20K	COBRE OFHC	8960	727615,7	6,51943667	1	727615,7	6,519436672	
					PINZA_OMT	COBRE OFHC	8960	429928,7	3,85216115	1	429928,7	3,852161152	
					ARO_TEFLON_BOCINA_2	TEFLON	2200	48867,47	0,10750843	1	48867,47	0,107508434	
				COLD_PLATE_50K									12,03
					COLD_PLATE_50K	COBRE OFHC	8960	1342247	12,0265331	1	1342247	12,02653312	
				VARILLA_20_399									8,94
					VARILLA_20_399	COBRE OFHC	8960	124676,3	1,11709965	8	997410,4	8,936797184	
				VARILLA_20_398									8,85
					VARILLA_20_398	COBRE OFHC	8960	123518,3	1,10672397	8	988146,4	8,853791744	
			SHIELDS										22,64
				SHIELD_20K									9,82
					SHIELD_20K_CILINDRO	AL 6082 T6	2710	2728096	7,39314016	1	2728096	7,39314016	
					SHIELD_20K_2_CONO	AL 6082 T6	2710	765477,8	2,07444484	1	765477,8	2,074444838	
					ARO_BASE_SHIELD_20_K	AL 6082 T6	2710	82906,63	0,22467697	1	82906,63	0,224676967	
					ARO_TAPA_SHIELD_20K	AL 6082 T6	2710	45531,1	0,12338928	1	45531,1	0,123389281	
				SHIELD_50K									12,82
					SHIELD_50K_CILINDRO	AL 6082 T6	2710	3269361	8,85996831	1	3269361	8,85996831	
					SHIELD_50K_CONO	AL 6082 T6	2710	870772,6	2,35979375	1	870772,6	2,359793746	
					SHIELD_50K_RECTANG	AL 6082 T6	2710	423312,2	1,14717606	1	423312,2	1,147176062	
					ARO_BASE_SHIELD_50_K	AL 6082 T6	2710	111375,8	0,30182842	1	111375,8	0,301828418	
					ARO_TAPA_SHIELD_50K	AL 6082 T6	2710	55628,18	0,15075237	1	55628,18	0,150752368	
		ENSAMBLAJE_VACIO											92,08
			SECCION_VACIO_1										61,74
					TAPA_VACIO	AL 6082 T6	2710	8045066	21,8021289	1	8045066	21,80212886	
					ARO_VACIO_1	AL 6082 T6	2710	1122303	3,04144113	1	1122303	3,04144113	
					ENVOLTURA_VACIO_1	AL 6082 T6	2710	6161543	16,6977815	1	6161543	16,69778153	
					ARO_VACIO_2	AL 6082 T6	2710	1122303	3,04144113	1	1122303	3,04144113	
					TAPA_VACIO_2	AL 6082 T6	2710	6332822	17,1619476	1	6332822	17,16194762	
			SECCION_VACIO_2										29,34
					ARO_VACIO_4	AL 6082 T6	2710	586975,2	1,59070279	1	586975,2	1,590702792	
					ENVOLTURA_VACIO_2_CILIND	AL 6082 T6	2710	5776384	15,6540006	1	5776384	15,65400064	
					ENVOLTURA_VACIO_2_CONO	AL 6082 T6	2710	2555401	6,92513671	1	2555401	6,92513671	
					ARO_VACIO_3	AL 6082 T6	2710	495492	1,34278332	1	495492	1,34278332	
					TAPA_VACIO_FRONTAL	AL 6082 T6	2710	1412209	3,82708639	1	1412209	3,82708639	
			SUJECCION_VACIO										0,99
					PIEZA_UNION_PLETINA	AL 6082 T6	2710	8683,65	0,02353269	32	277876,8	0,753046128	
					PLETINA_30_90	G10	1850	8100	0,014985	16	129600	0,23976	
	RECEPTOR												15,88
					INTRUMENTO	AL 6082 T6	2710	5860732	15,8825837	1	5860732	15,88258372	
	COOLING_SYSTEM												18,09
					COOLING_SYSTEM	AL 6082 T6	2710	6674486	18,0878571	1	6674486	18,08785706	



MFIS			
	Fecha	Autor	 INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS INSTRUMENTACIÓN DEPARTAMENTO DE MECÁNICA
Nombre	03/05/16	Adrián	
Apellidos		Lorenzo Rodr.	
Id. s. normas	UNE-EN-DIN		
ESCALA: 1:10	CRIOSTATO		MASA: 178,86 kg



MFIS			
	Fecha	Autor	 INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS INSTRUMENTACIÓN DEPARTAMENTO DE MECÁNICA
Nombre	03/05/16	Adrián	
Apellidos		Lorenzo Rodr.	
Id. s. normas	UNE-EN-DIN		
ESCALA: 1:10	SECCIÓN_CRIOSTATO		MASA: 178,86 kg



SECCIÓN B-B

MFIS

	Fecha	Autor
Nombre	03/05/16	Adrian
Apellidos		Lorenzo Rodr.
Id. s. normas	UNE-EN-DIN	

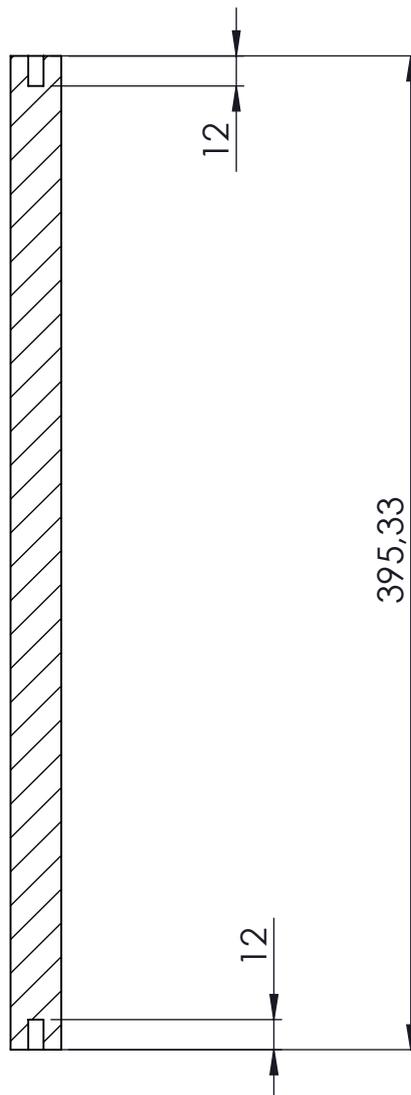
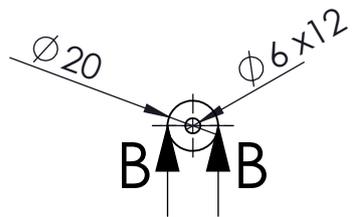


INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS
 INSTRUMENTACIÓN
 DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

ESCALA:
 1:3

VARILLA_20_399

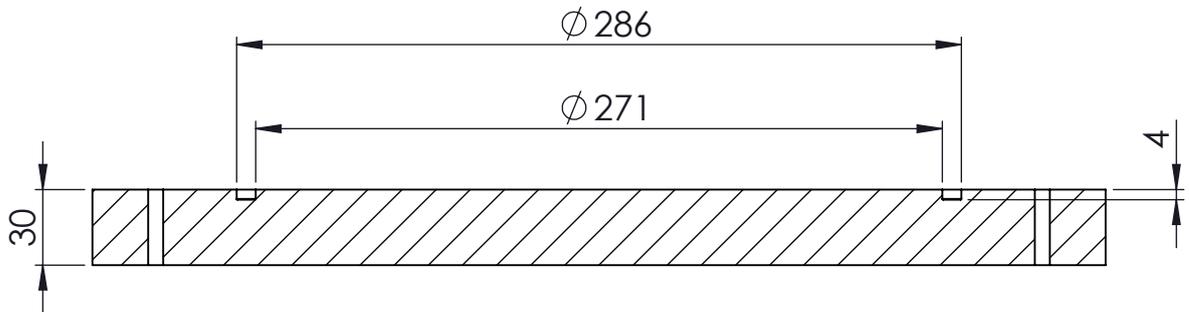
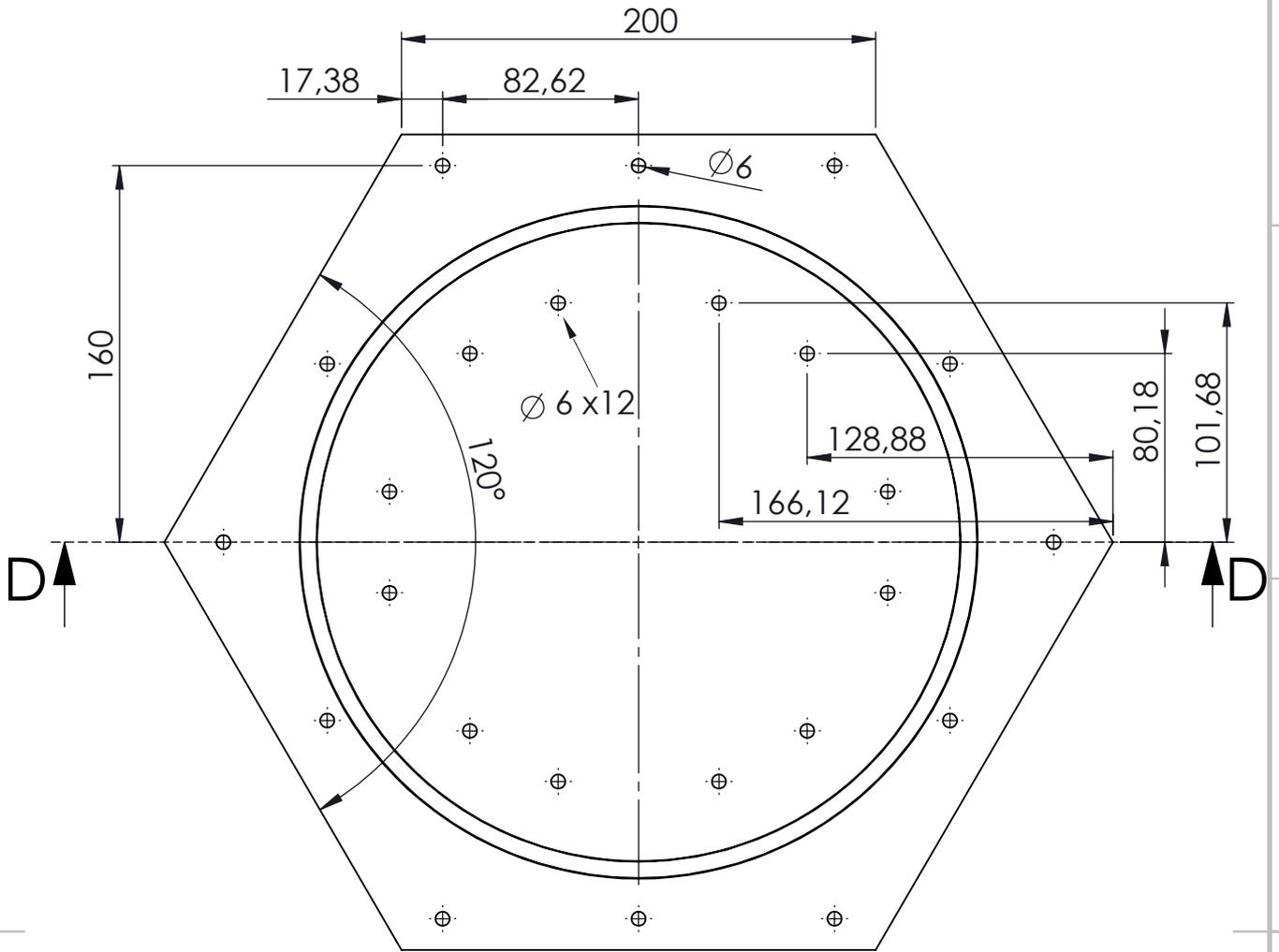
MATERIAL: COBRE OFHC
 MASA: 1,12 kg



SECCIÓN B-B

MFIS

Nombre		Fecha	Autor		INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS INSTRUMENTACIÓN DEPARTAMENTO DE MECÁNICA
Apellidos		03/05/16	Adrian		
Id. s. normas		UNE-EN-DIN	Lorenzo Rodr.		
ESCALA:	VARILLA_20_398			MATERIAL:	COBRE OFHC
1:3				MASA:	1,11 kg



SECCIÓN D-D

MFIS

Nombre	Fecha	Autor
	03/05/16	Adrian
Apellidos		Lorenzo Rodr.
Id. s. normas	UNE-EN-DIN	

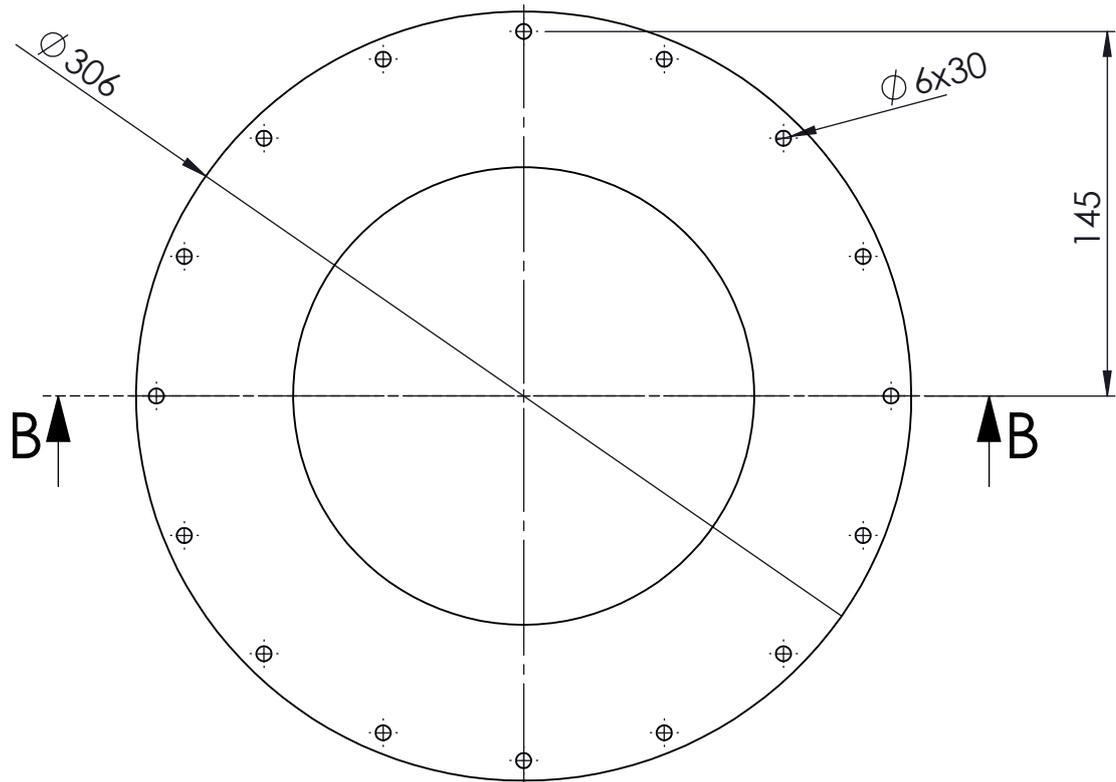


INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS
INSTRUMENTACIÓN
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

ESCALA:
1:3

TAPA_VACIO_RECEPTOR

MATERIAL: ALUMINIO 6082
MASA: 6,81 kg



SECCIÓN B-B

MFIS

Nombre	Fecha	Autor
Apellidos	03/05/16	Adrian
Id. s. normas		Lorenzo Rodr.
	UNE-EN-DIN	

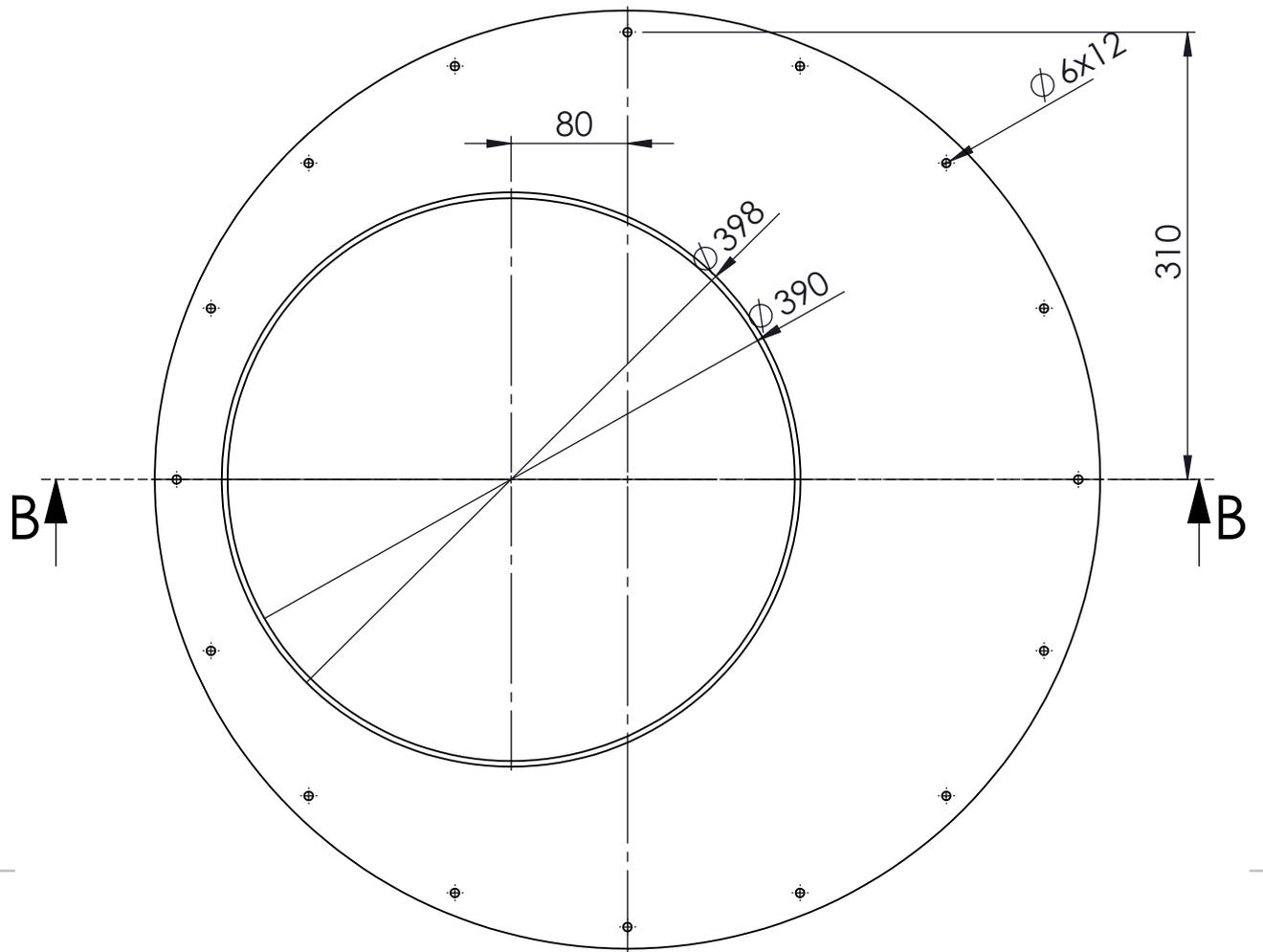


INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS
 INSTRUMENTACIÓN
 DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

ESCALA:
 1:3

TAPA_VACIO_FRONTAL

MATERIAL: ALUMINIO 6082
 MASA: 3,83 kg



SECCIÓN B-B

MFIS

Nombre	Fecha	Autor
Apellidos	03/05/16	Adrian
Id. s. normas		Lorenzo Rodr.
	UNE-EN-DIN	

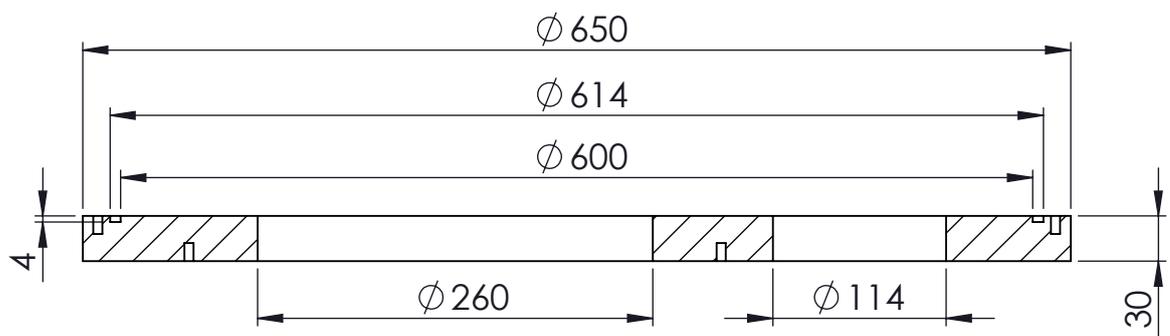
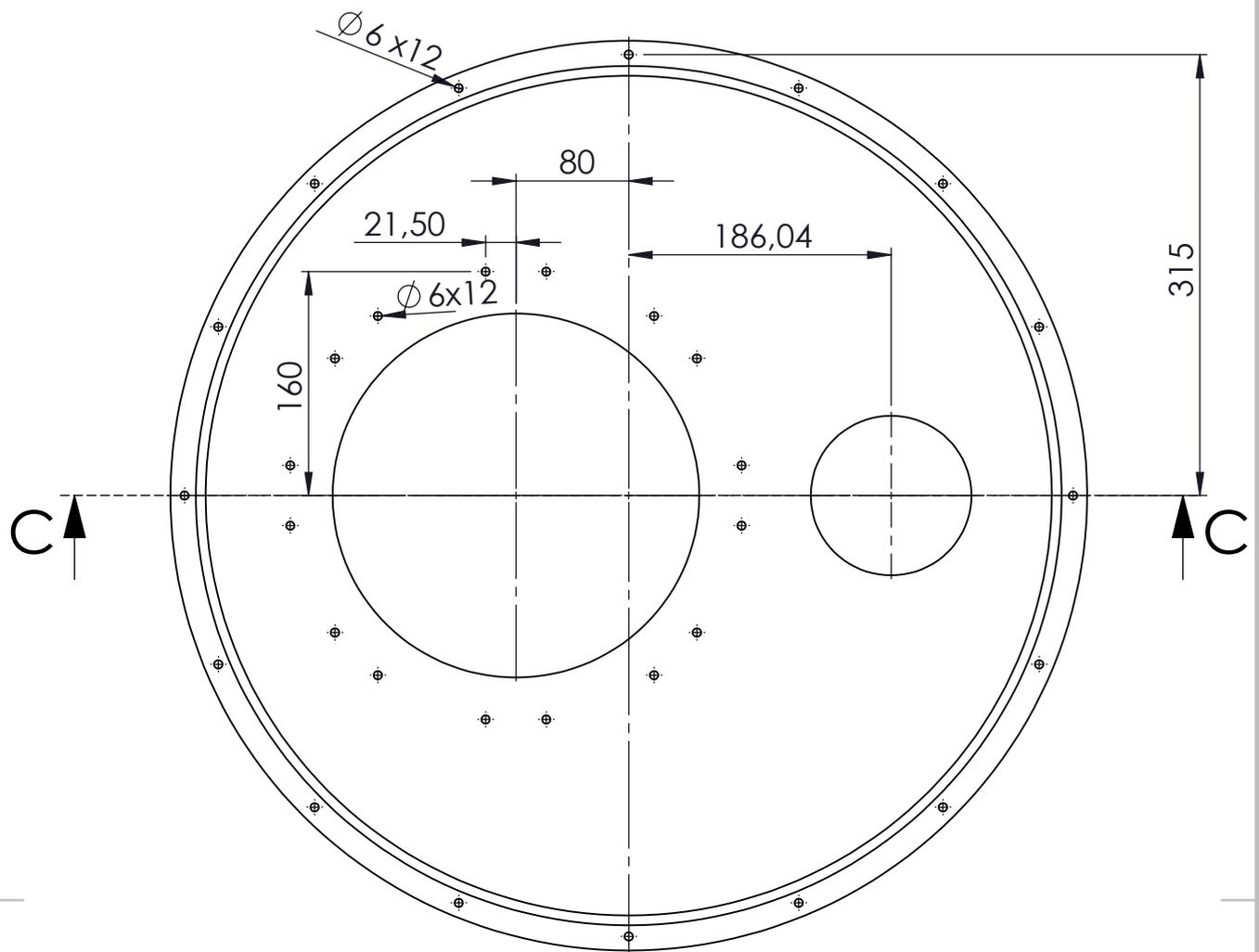


INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS
 INSTRUMENTACIÓN
 DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

ESCALA:
 1:5

TAPA_VACIO_2

MATERIAL: ALUMINIO 6082
 MASA: 17,16 kg



SECCIÓN C-C

MFIS

Nombre	Fecha	Autor
	03/05/16	Adrian
Apellidos		Lorenzo Rodr.
Id. s. normas	UNE-EN-DIN	

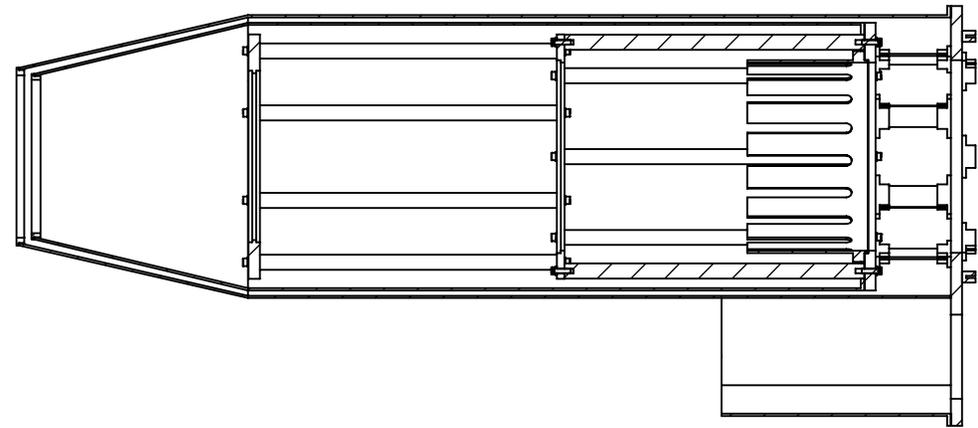
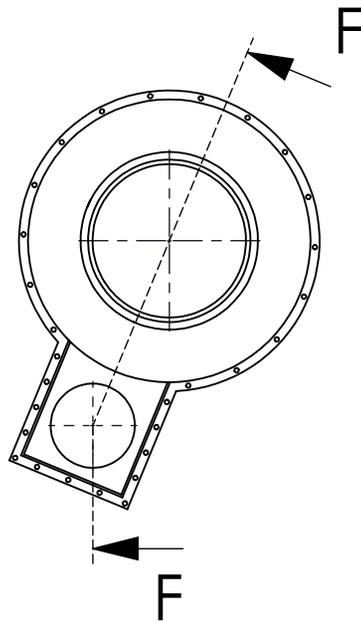


INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS
 INSTRUMENTACIÓN
 DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

ESCALA:
1:5

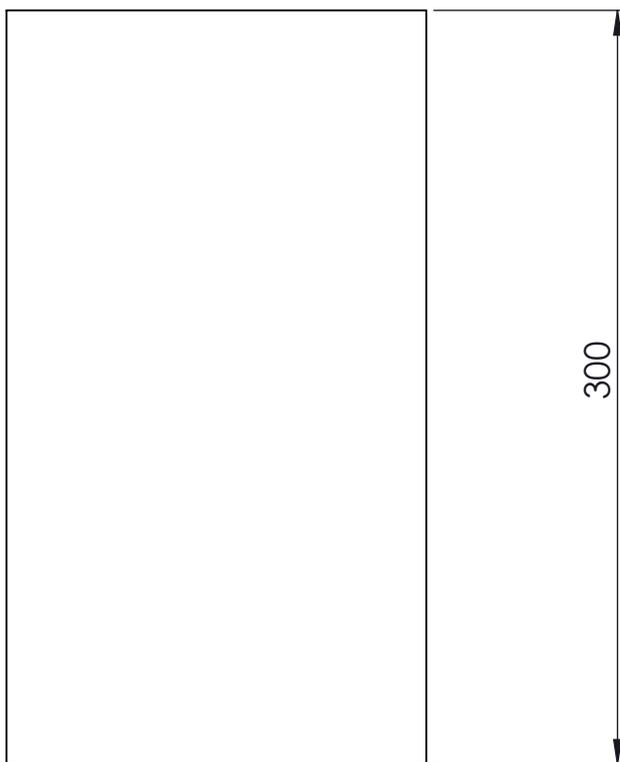
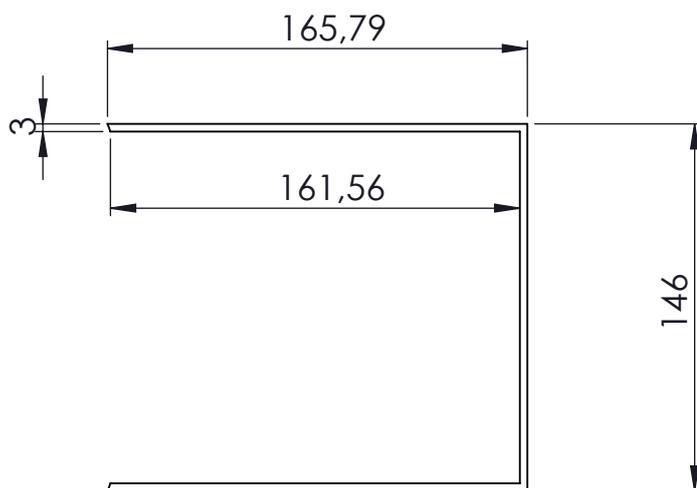
TAPA_VACIO

MATERIAL: ALUMINIO 6082
 MASA: 21,8 kg



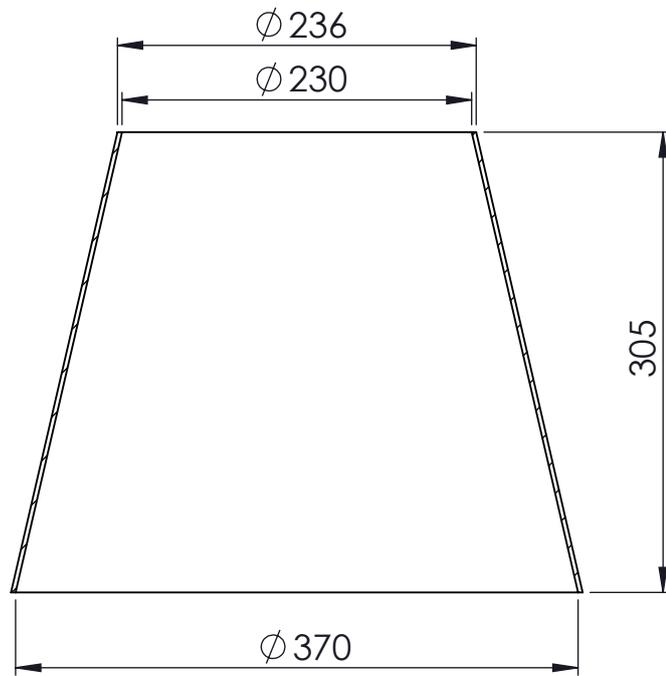
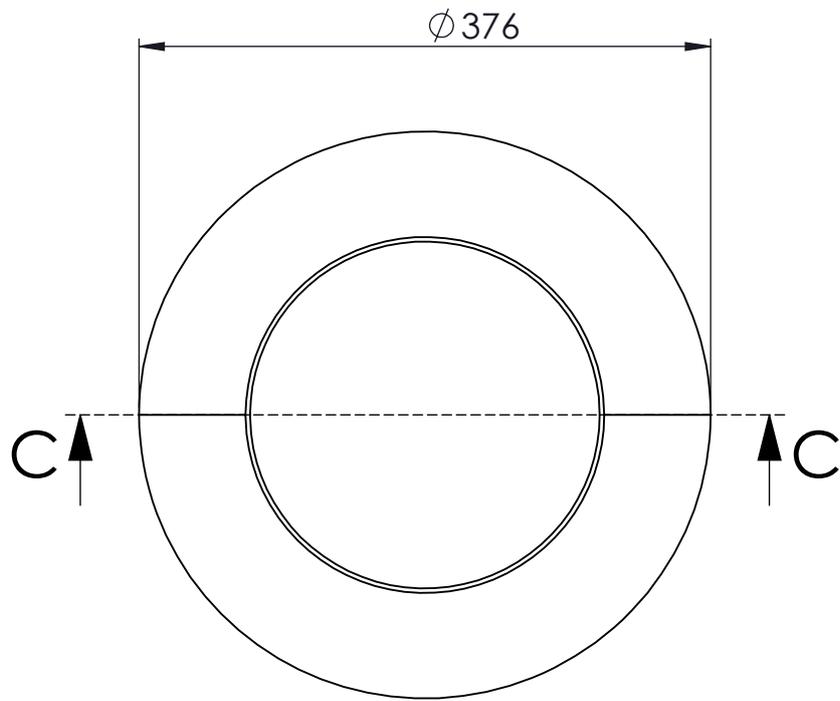
SECCIÓN F-F

MFIS			
	Fecha	Autor	 INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS INSTRUMENTACIÓN DEPARTAMENTO DE MECÁNICA
Nombre	03/05/16	Adrián	
Apellidos		Lorenzo Rodr.	
Id. s. normas	UNE-EN-DIN		
ESCALA:	SECCIÓN_SHIELDS		MASA:
1:10			81,40 kg



MFIS

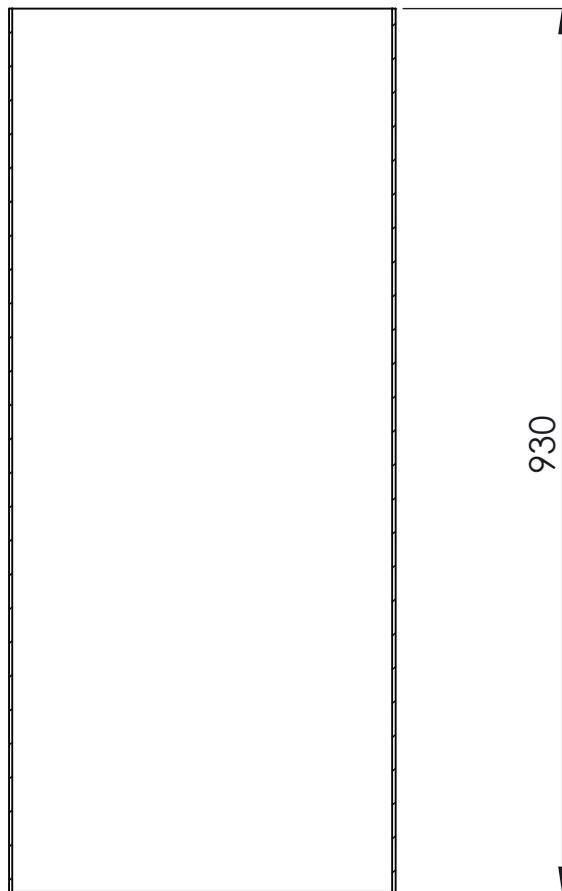
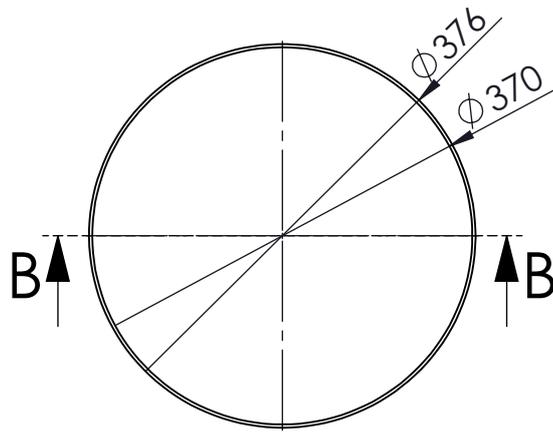
	Fecha	Autor		INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS INSTRUMENTACIÓN DEPARTAMENTO DE MECÁNICA
Nombre	03/05/16	Adrian		
Apellidos		Lorenzo Rodr.		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN			
ESCALA: 1:5	SHIELD_50K_RECTANGULO			MATERIAL: ALUMINIO 6082 MASA: 1,15 kg



SECCIÓN C-C

MFIS

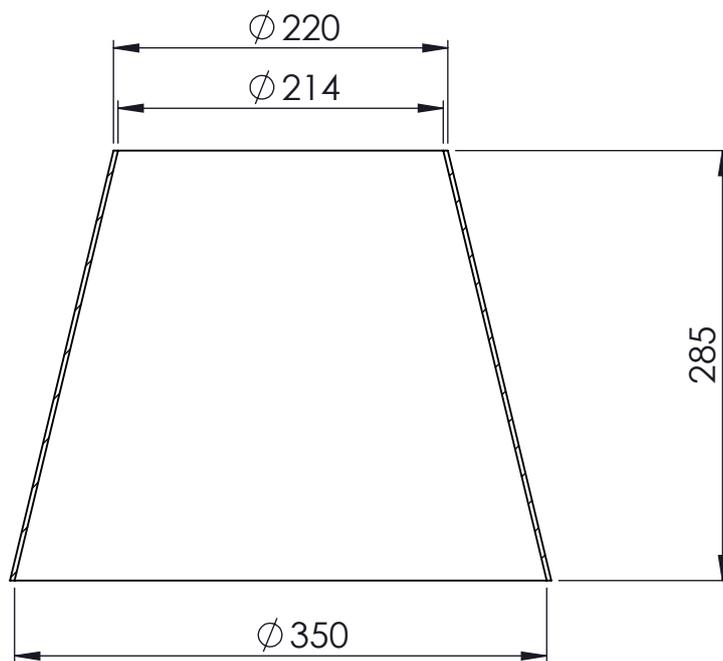
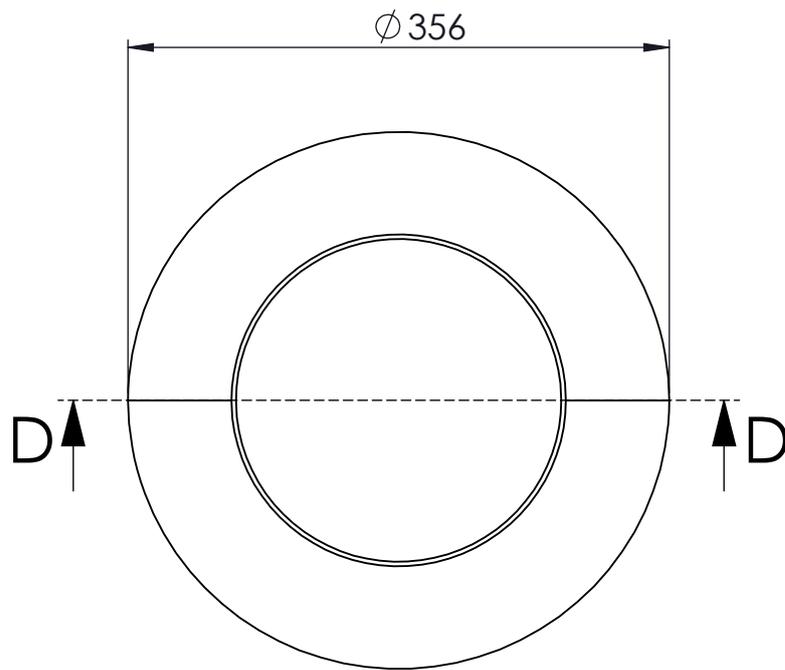
Nombre		Fecha	Autor		INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS INSTRUMENTACIÓN DEPARTAMENTO DE MECÁNICA
Apellidos		03/05/16	Adrian		
Id. s. normas		UNE-EN-DIN	Lorenzo Rodr.		
ESCALA:	SHIELD_50K_CONO			MATERIAL:	ALUMINIO 6082
1:5				MASA:	2,36 kg



SECCIÓN B-B

MFIS

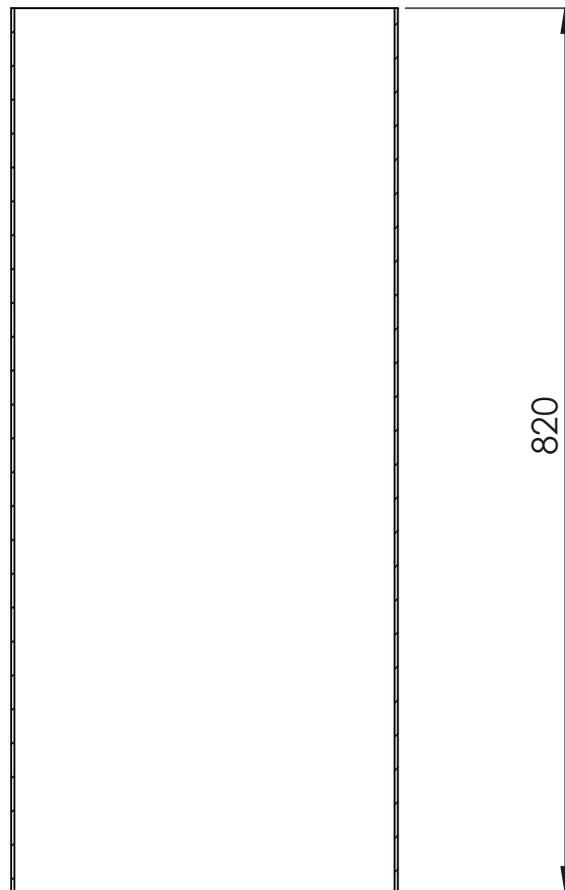
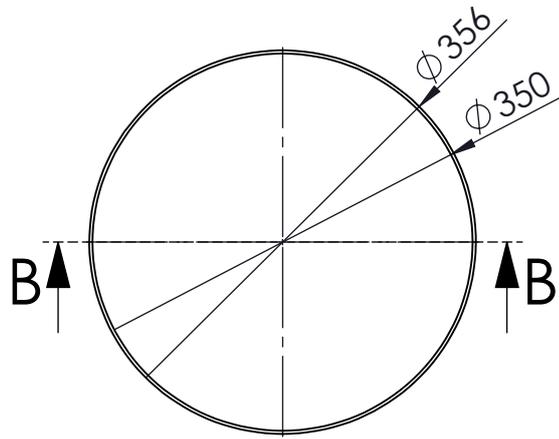
				INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS INSTRUMENTACIÓN DEPARTAMENTO DE MECÁNICA	
Nombre	Fecha	Autor			
	03/05/16	Adrian			
Apellidos		Lorenzo Rodr.			
Id. s. normas	UNE-EN-DIN				
ESCALA:	SHIELD_50K_CILINDRO			MATERIAL:	ALUMINIO 6082
1:7				MASA:	8,86 kg



SECCIÓN D-D

MFIS

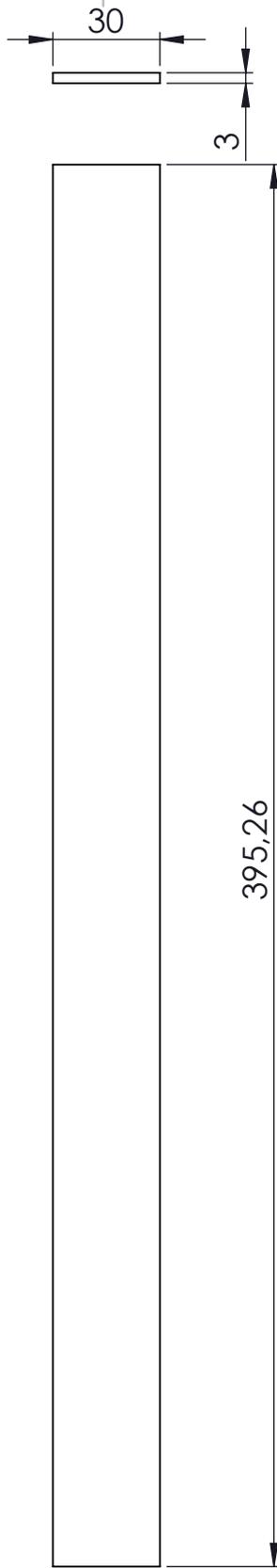
Nombre		Fecha	Autor		INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS INSTRUMENTACIÓN DEPARTAMENTO DE MECÁNICA
Apellidos		03/05/16	Adrian		
Id. s. normas		UNE-EN-DIN	Lorenzo Rodr.		
ESCALA:	SHIELD_20K_CONO			MATERIAL:	ALUMINIO 6082
1:5				MASA:	2,07 kg



SECCIÓN B-B

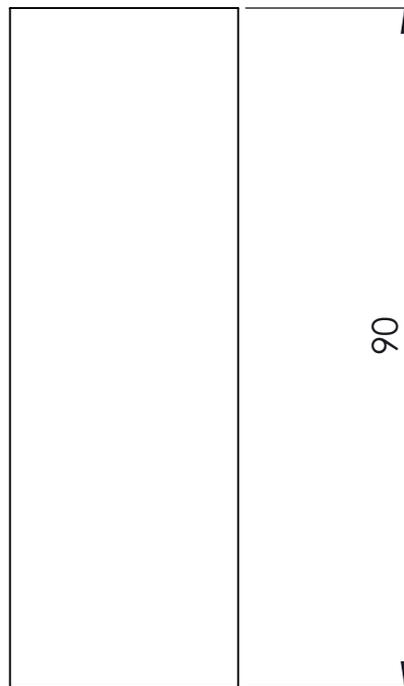
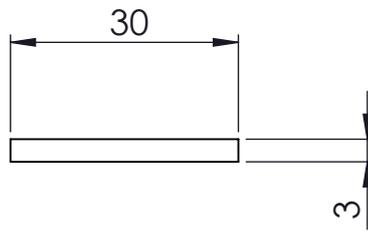
MFIS

				INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS INSTRUMENTACIÓN DEPARTAMENTO DE MECÁNICA	
Nombre	Fecha	Autor			
	03/05/16	Adrian			
Apellidos		Lorenzo Rodr.			
Id. s. normas	UNE-EN-DIN				
ESCALA:	SHIELD_20K_CILINDRO			MATERIAL:	ALUMINIO 6082
1:7				MASA:	7,39 kg



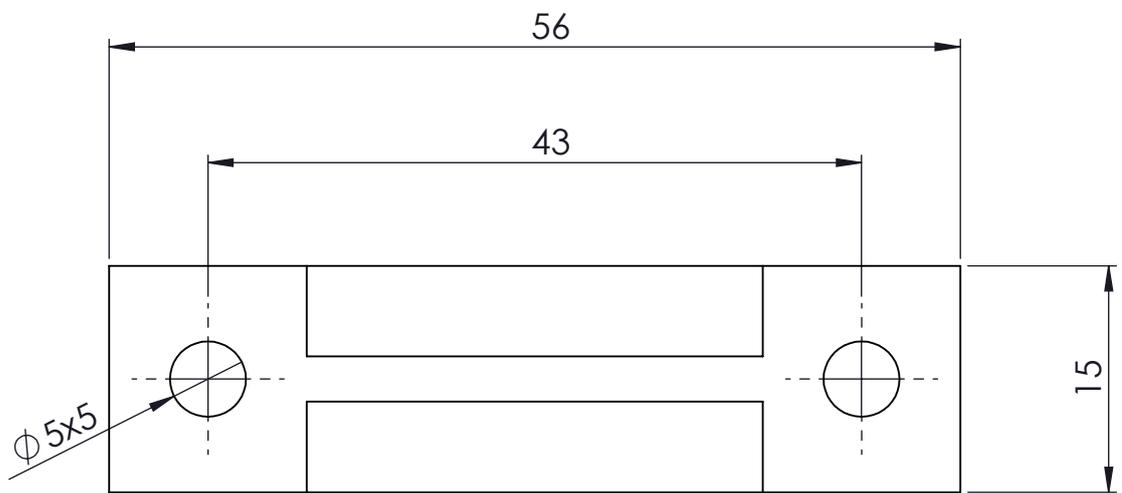
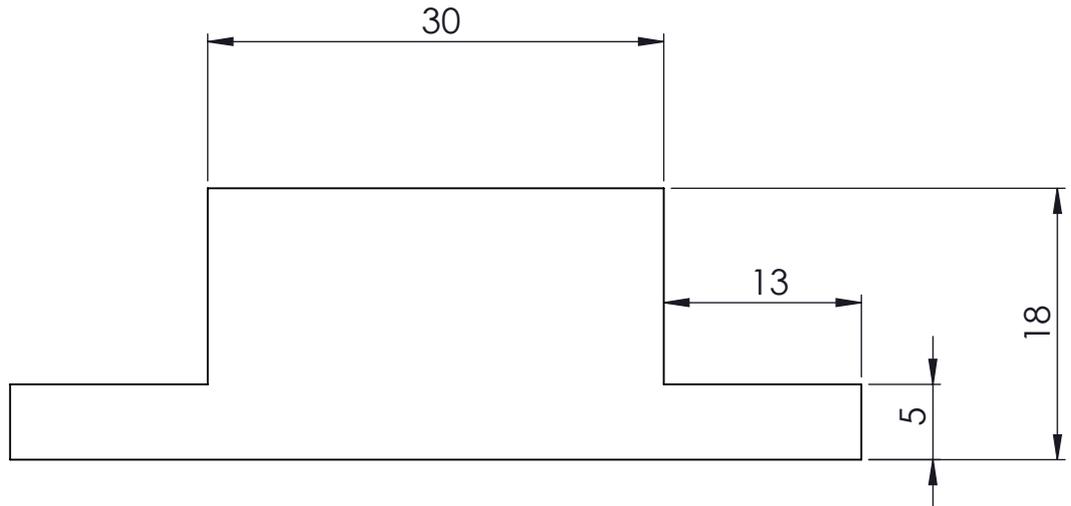
MFIS

Fecha		Autor			INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS INSTRUMENTACIÓN DEPARTAMENTO DE MECÁNICA
Nombre		Adrian			
Apellidos		Lorenzo Rodr.			
Id. s. normas		UNE-EN-DIN			
ESCALA:	PLETINA_30_350			MATERIAL:	G10
1:2				MASA:	0,066 kg



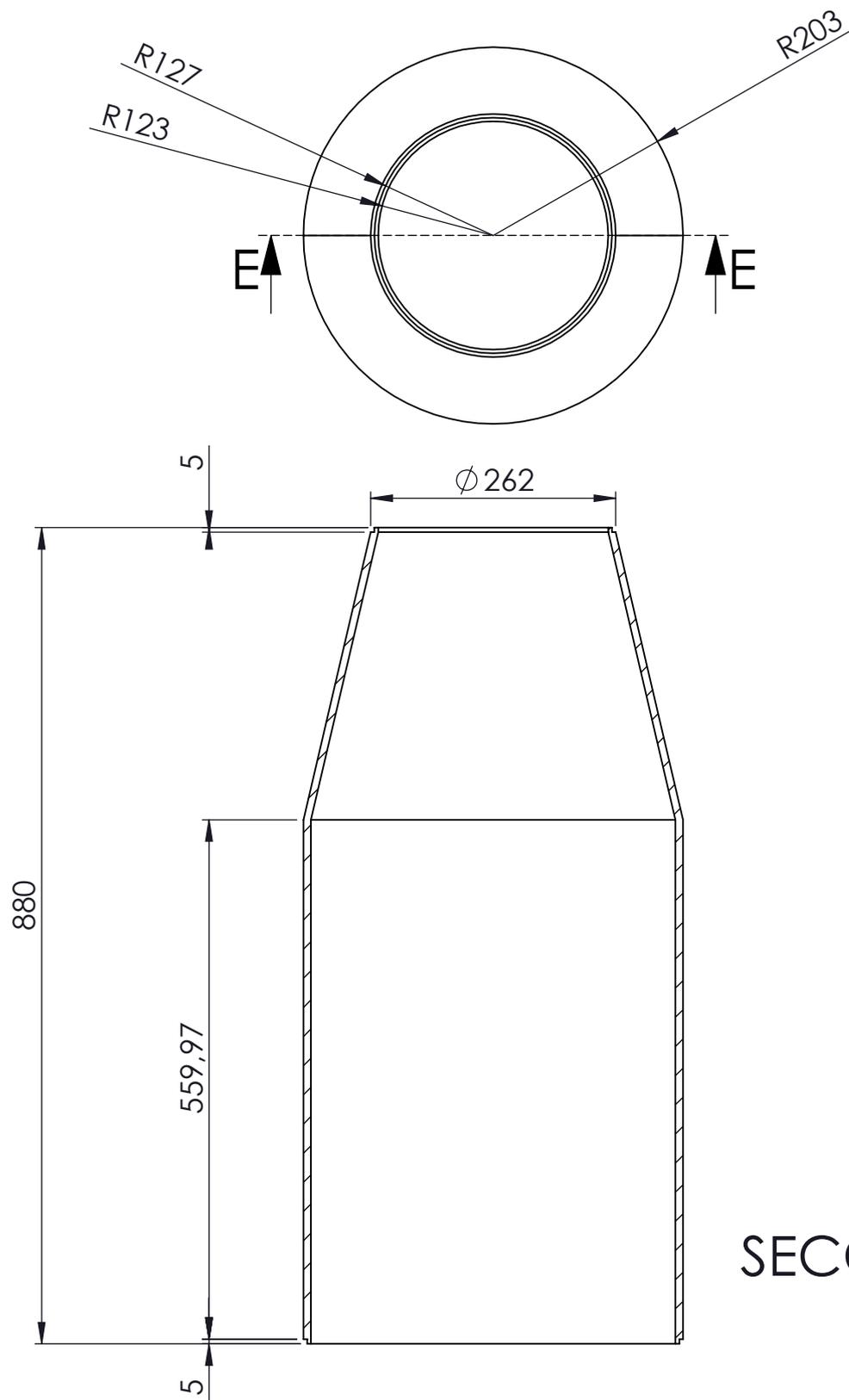
MFIS

	Fecha	Autor		INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS INSTRUMENTACIÓN DEPARTAMENTO DE MECÁNICA
Nombre	03/05/16	Adrian		
Apellidos		Lorenzo Rodr.		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN			
ESCALA: 1:1	PLETINA_30_90			MATERIAL: G10 MASA: 0,015 kg



MFIS

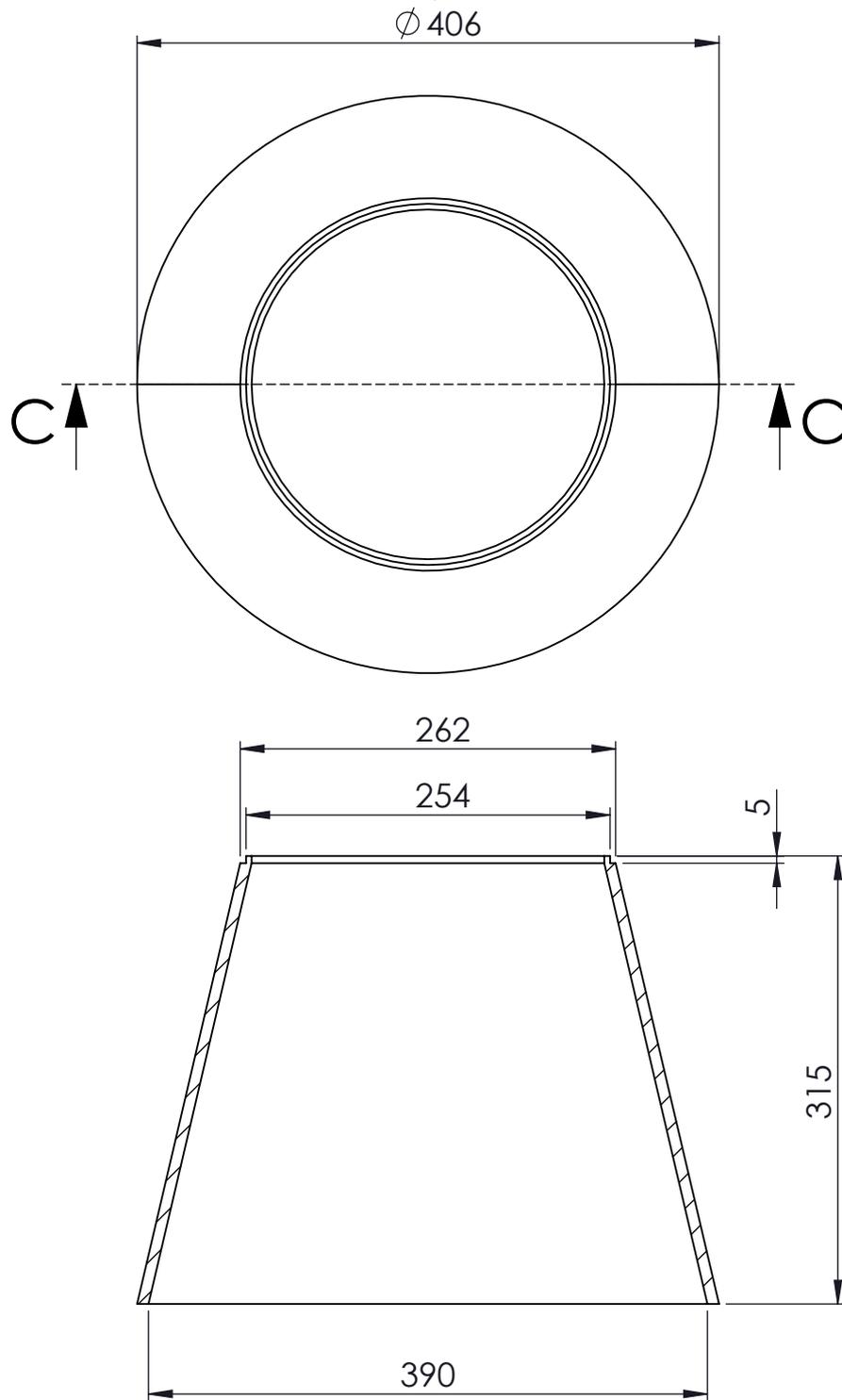
	Fecha	Autor		INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS INSTRUMENTACIÓN DEPARTAMENTO DE MECÁNICA
Nombre	03/05/16	Adrian		
Apellidos		Lorenzo Rodr.		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN			
ESCALA: 2:1	PIEZA_UNION_PLETINA			MATERIAL: ALUMINIO 6082 MASA: 0,75 kg



SECCIÓN E-E

MFIS

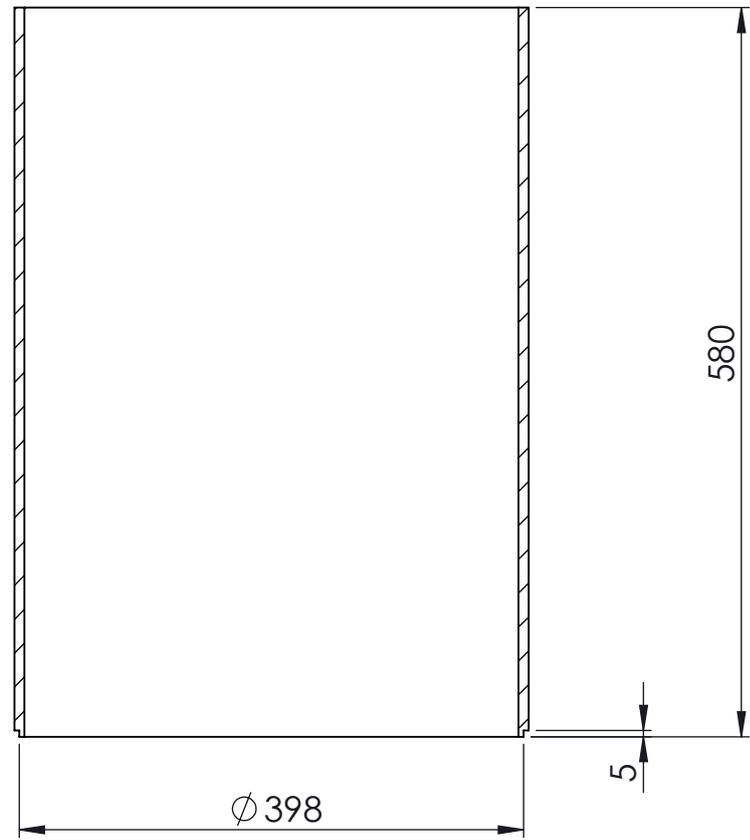
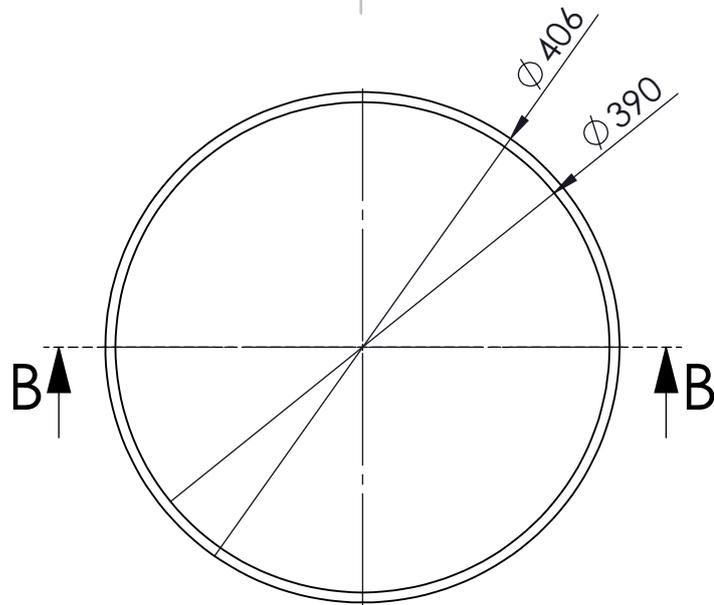
Nombre		Fecha	Autor		INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS INSTRUMENTACIÓN DEPARTAMENTO DE MECÁNICA
Apellidos		03/05/16	Adrian		
Id. s. normas		UNE-EN-DIN	Lorenzo Rodr.		
ESCALA:	ENVOLTURA_VACIO_2			MATERIAL:	ALUMINIO 6082
1:7				MASA:	22,17 kg



SECCIÓN C-C

MFIS

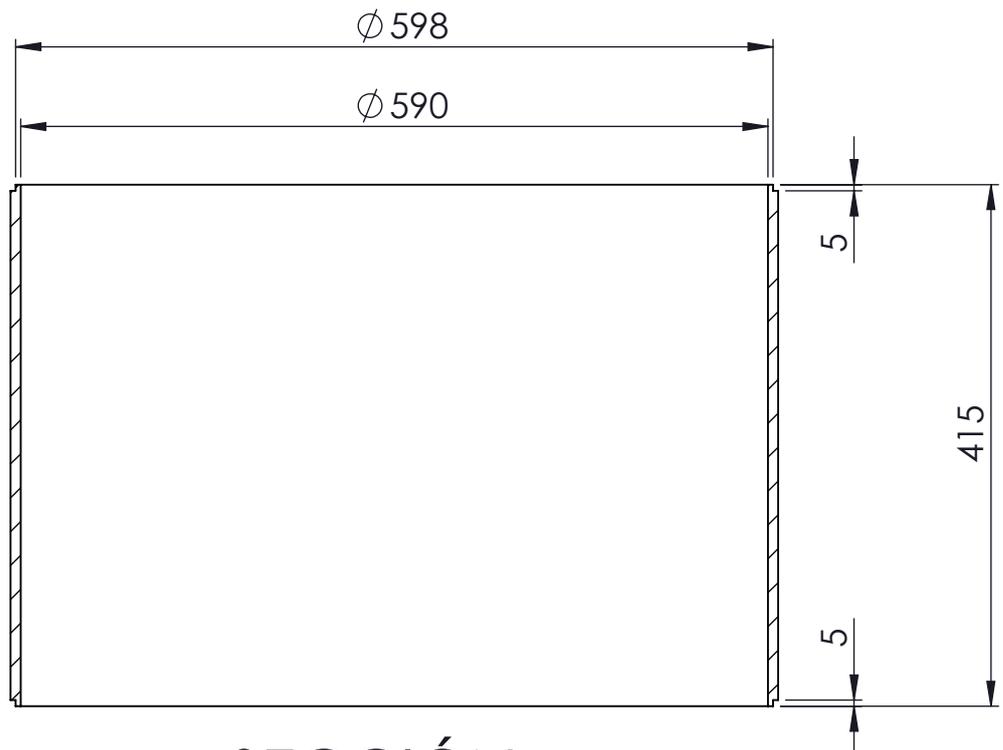
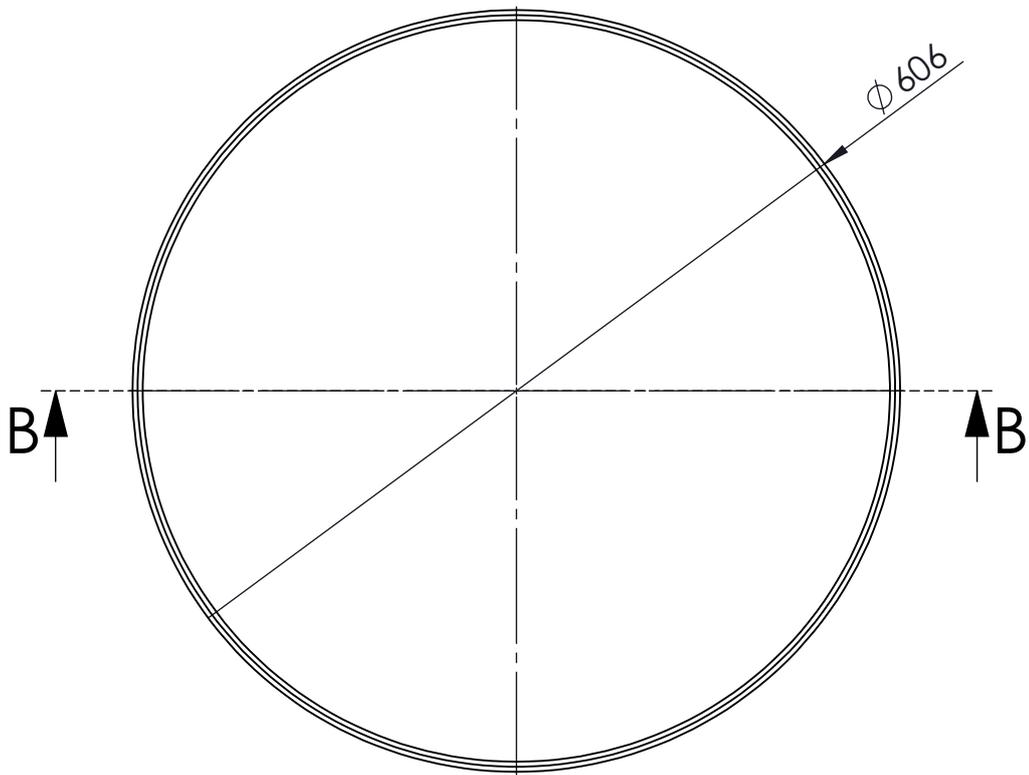
Nombre		Fecha	Autor		INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS INSTRUMENTACIÓN DEPARTAMENTO DE MECÁNICA
Apellidos		03/05/16	Adrian		
Id. s. normas		UNE-EN-DIN	Lorenzo Rodr.		
ESCALA:	ENVOLTURA_VACIO_2_CONO			MATERIAL:	ALUMINIO 6082
1:5				MASA:	6,93 kg



SECCIÓN B-B

MFIS

	Fecha	Autor		INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS INSTRUMENTACIÓN DEPARTAMENTO DE MECÁNICA
Nombre	03/05/16	Adrian		
Apellidos		Lorenzo Rodr.		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN			
ESCALA: 1:6	ENVOLTURA_VACIO_2_CILINDRO			MATERIAL: ALUMINIO 6082 MASA: 15,65 kg



SECCIÓN B-B

MFIS

	Fecha	Autor
Nombre	03/05/16	Adrian
Apellidos		Lorenzo Rodr.
Id. s. normas	UNE-EN-DIN	

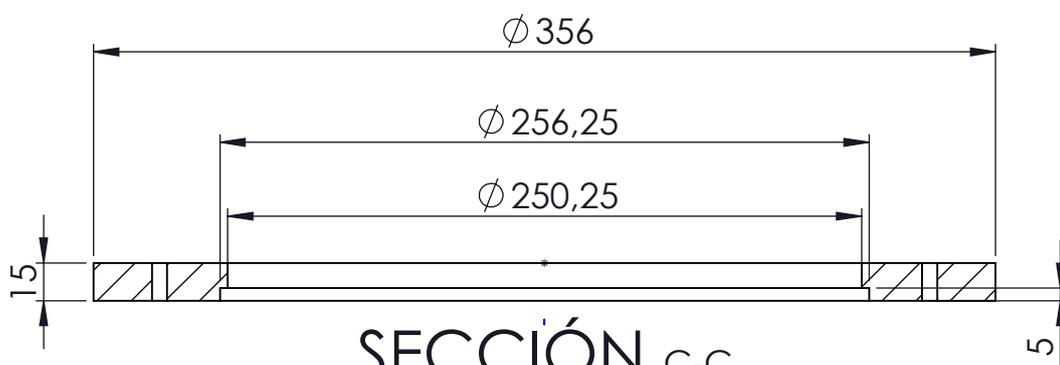
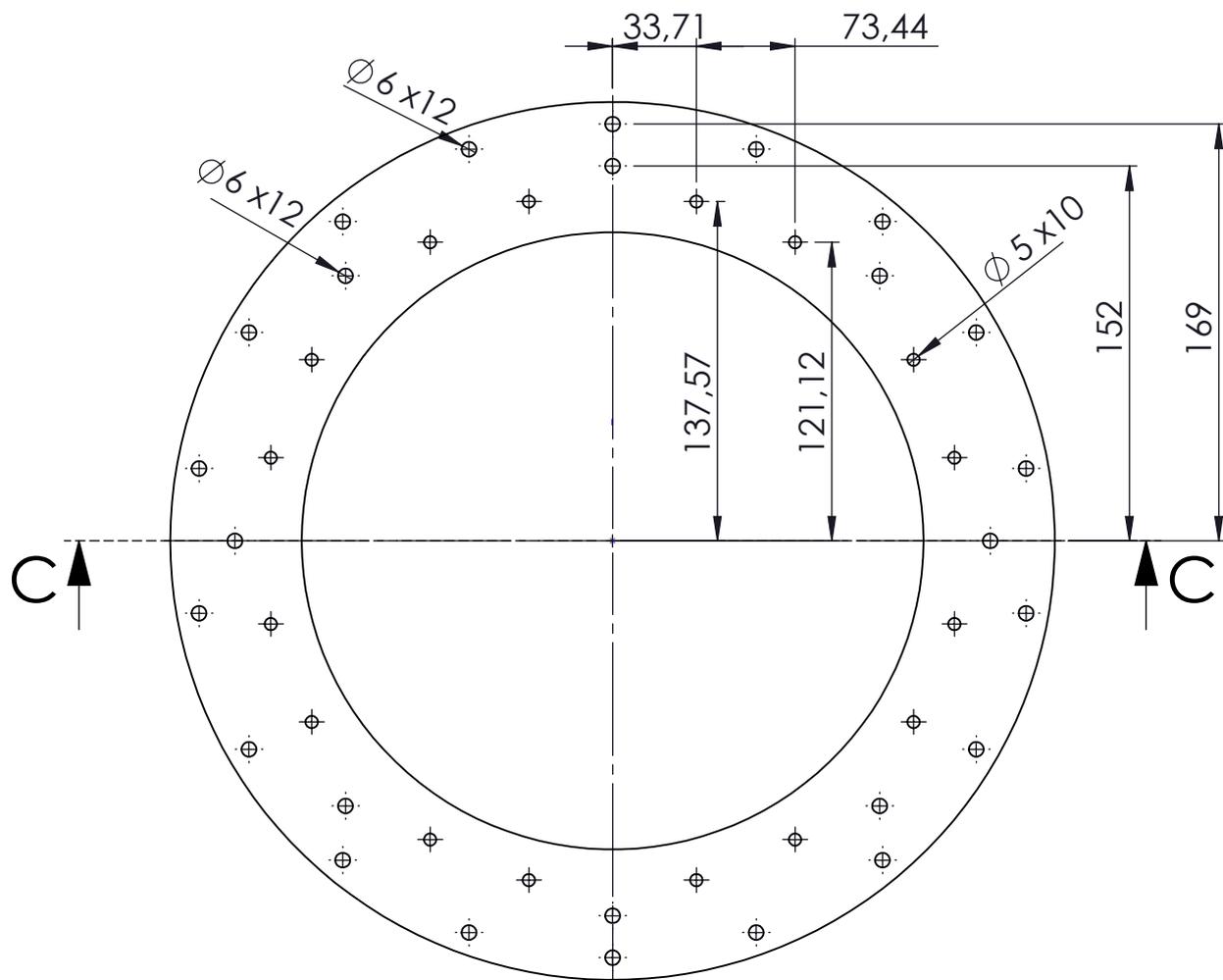


INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS
 INSTRUMENTACIÓN
 DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

ESCALA:
1:6

ENVOLTURA_VACIO_1

MATERIAL: ALUMINIO 6082
 MASA: 16,7 kg



SECCIÓN C-C

MFIS

Nombre	Fecha	Autor
	03/05/16	Adrian
Apellidos		Lorenzo Rodr.
Id. s. normas	UNE-EN-DIN	

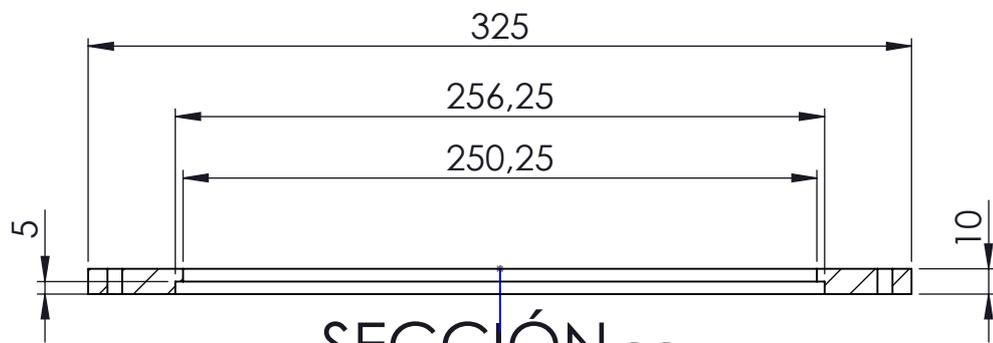
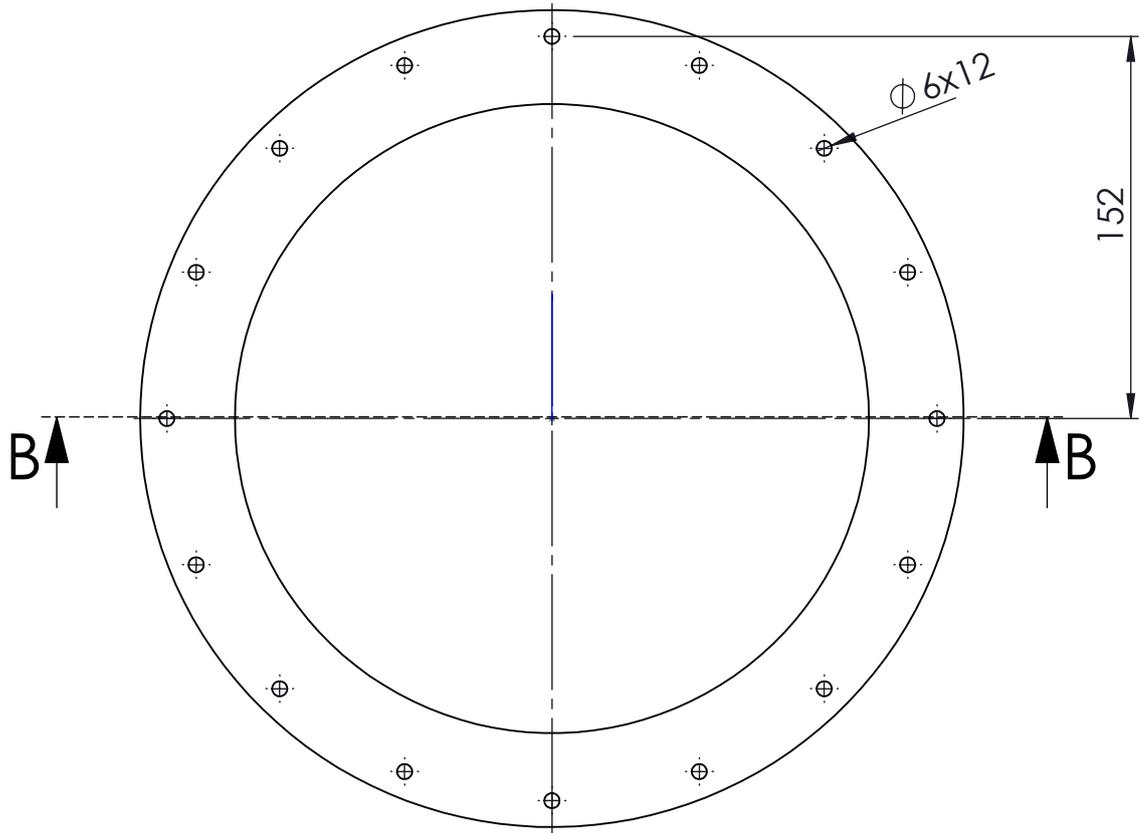


INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS
 INSTRUMENTACIÓN
 DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

ESCALA:
 1:3

COLD_PLATE_20K

MATERIAL: COBRE OFHC
 MASA: 6,52 kg



SECCIÓN B-B

MFIS

Nombre	Fecha	Autor
Apellidos	03/05/16	Adrian
Id. s. normas		Lorenzo Rodr.
	UNE-EN-DIN	

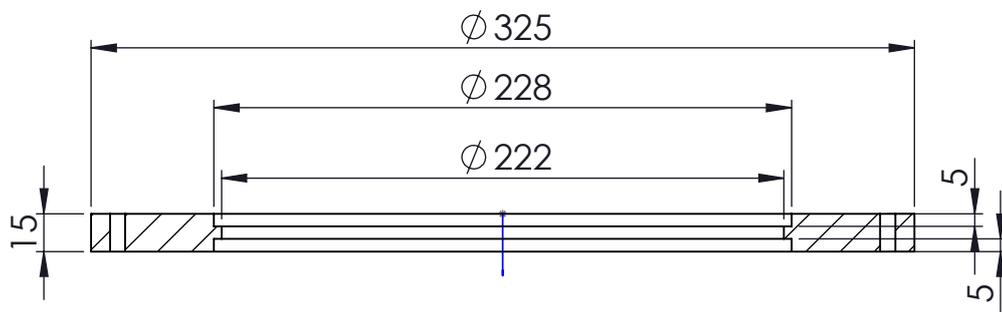
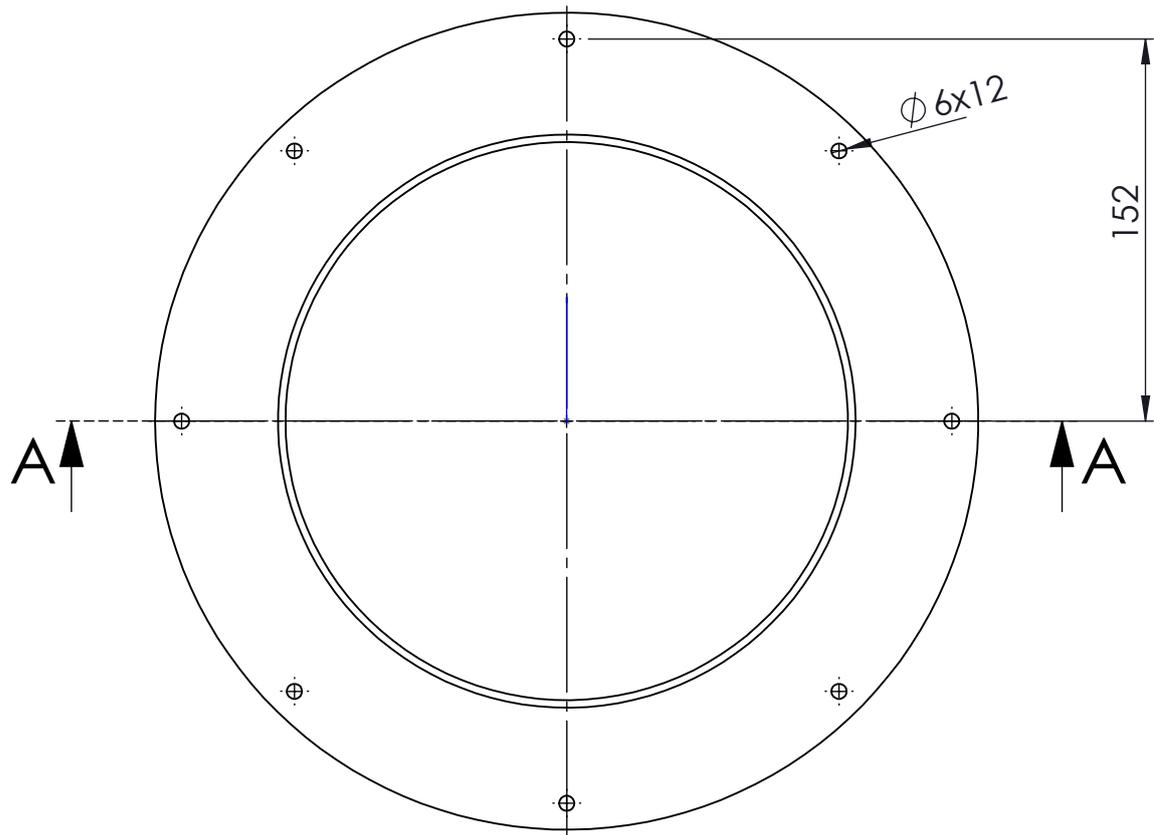


INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS
INSTRUMENTACIÓN
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

ESCALA:
1:3

BASE_FRIA_BOCINA_2

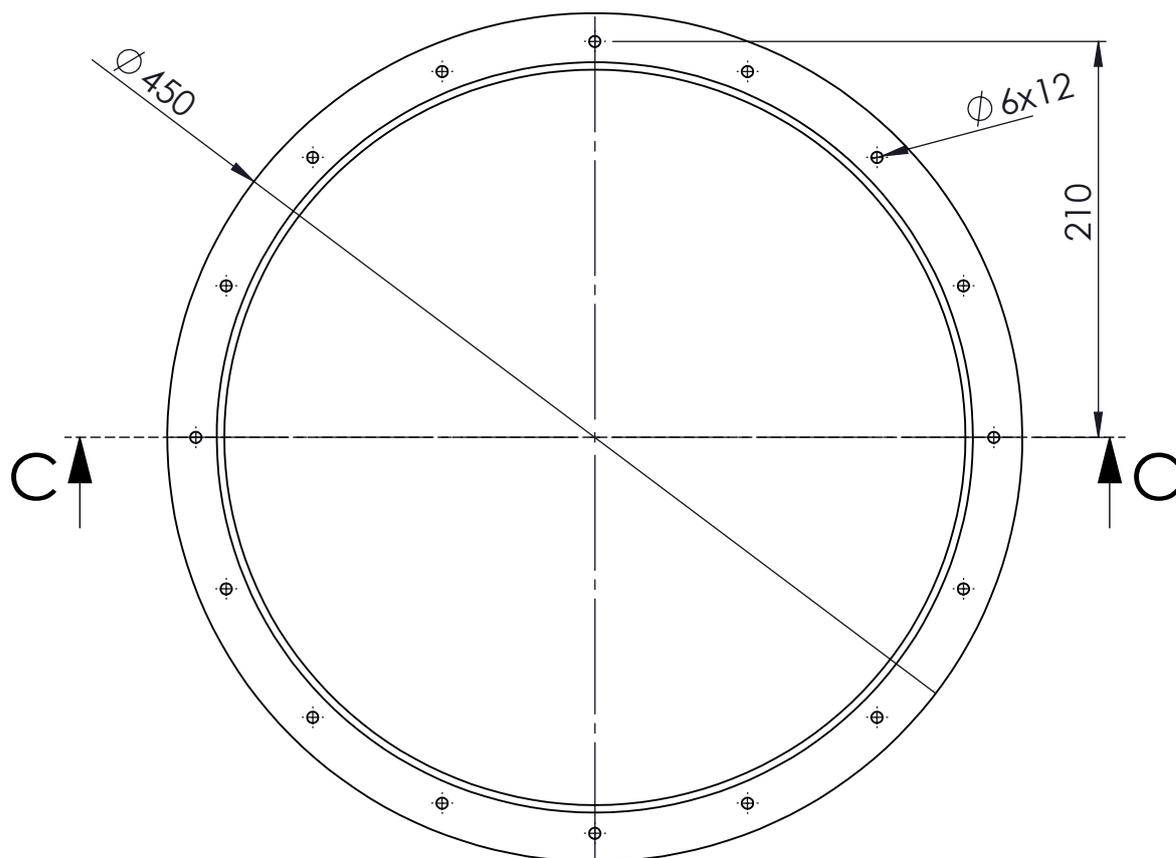
MATERIAL: COBRE OFHC
MASA: 2,88 kg



SECCIÓN A-A

MFIS

Nombre		Fecha	Autor		INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS INSTRUMENTACIÓN DEPARTAMENTO DE MECÁNICA
Apellidos		03/05/16	Adrian		
Id. s. normas		UNE-EN-DIN	Lorenzo Rodr.		
ESCALA:	BASE_FRIA_BOCINA_1			MATERIAL:	COBRE OFHC
1:3				MASA:	5,73 kg



SECCIÓN C-C

MFIS

Nombre	Fecha	Autor
	03/05/16	Adrian
Apellidos		Lorenzo Rodr.
Id. s. normas	UNE-EN-DIN	

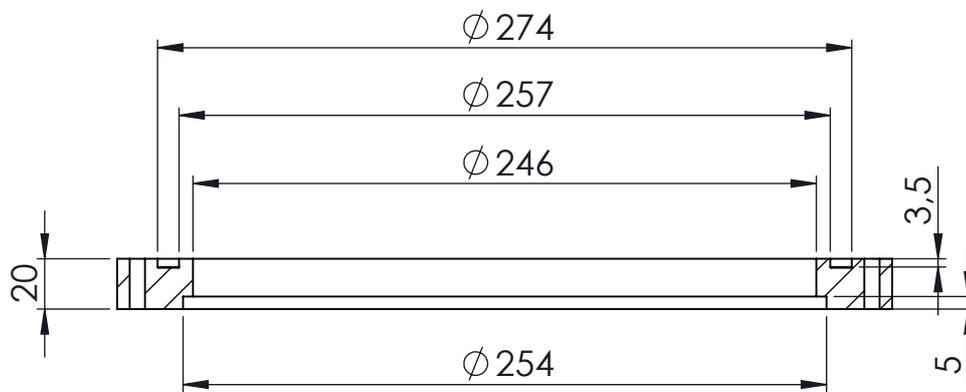
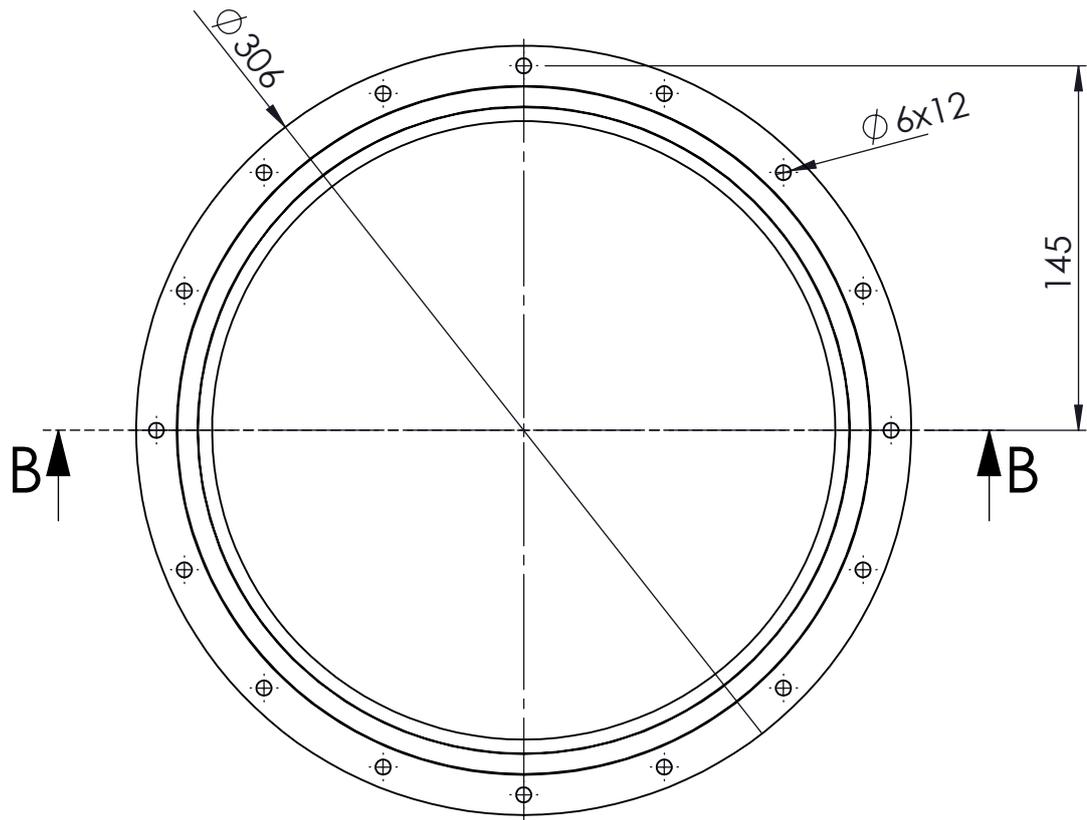


INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS
 INSTRUMENTACIÓN
 DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

ESCALA:
1:4

ARO_VACIO_4

MATERIAL: ALUMINIO 6082
 MASA: 1,59 kg



SECCIÓN B-B

MFIS

Nombre	Fecha	Autor
	03/05/16	Adrian
Apellidos		Lorenzo Rodr.
Id. s. normas	UNE-EN-DIN	

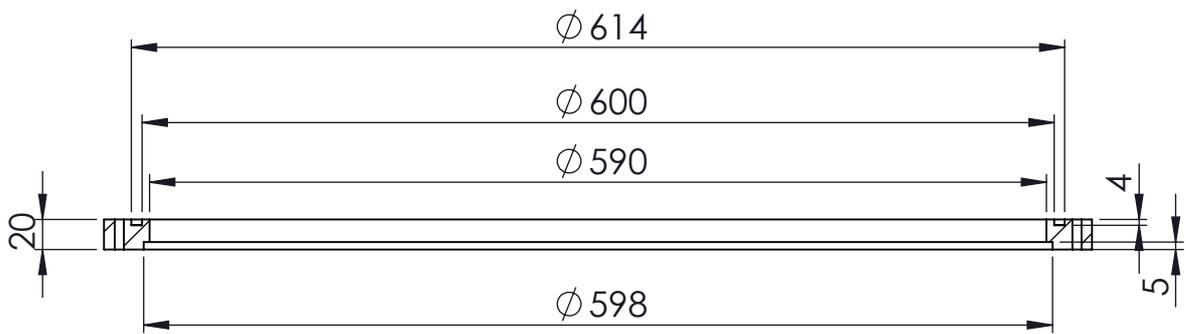
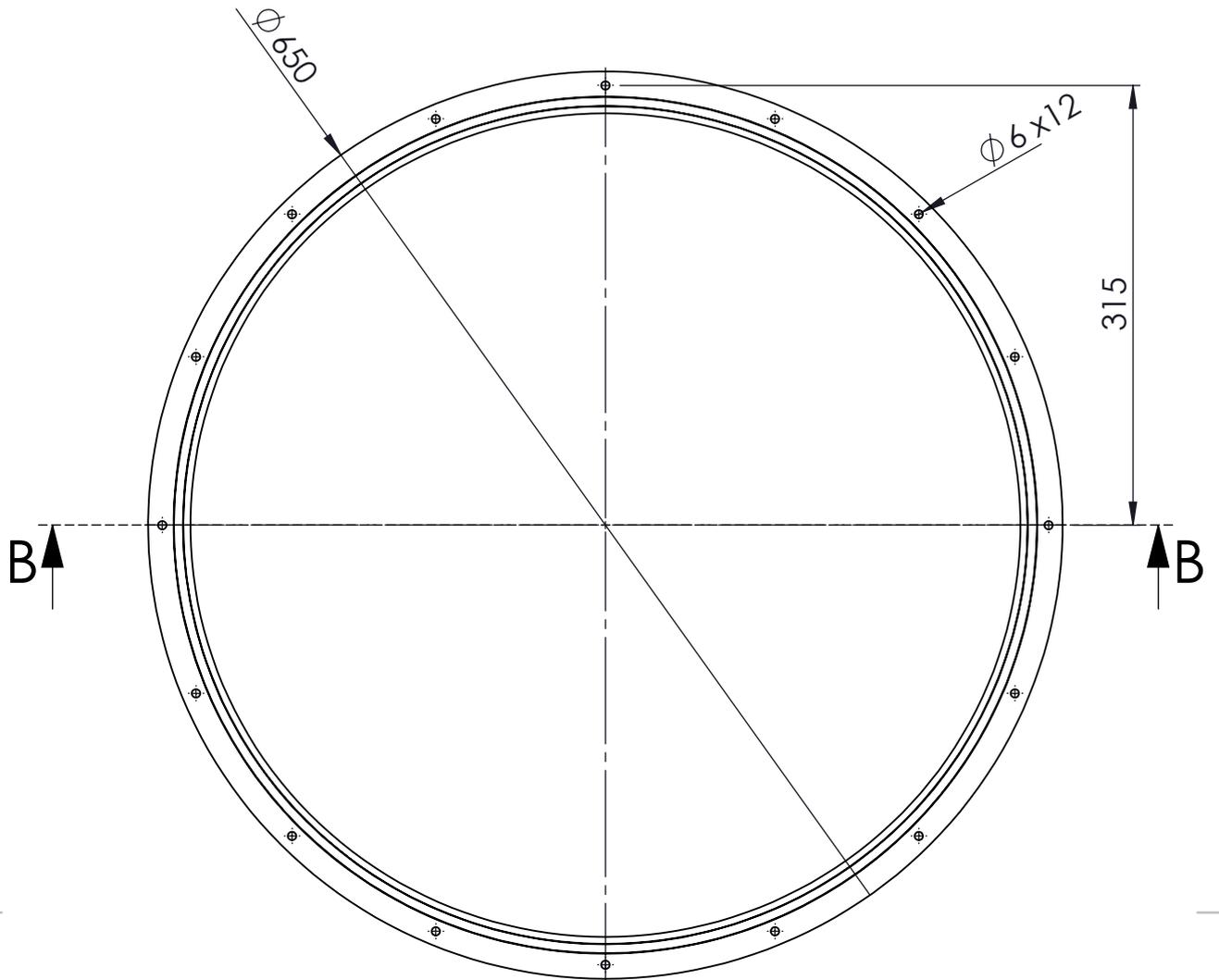


INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS
INSTRUMENTACIÓN
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

ESCALA:
1:3

ARO_VACIO_3

MATERIAL: ALUMINIO 6082
MASA: 1,34 kg



SECCIÓN B-B

MFIS

Nombre	Fecha	Autor
	03/05/16	Adrian
Apellidos		Lorenzo Rodr.
Id. s. normas	UNE-EN-DIN	

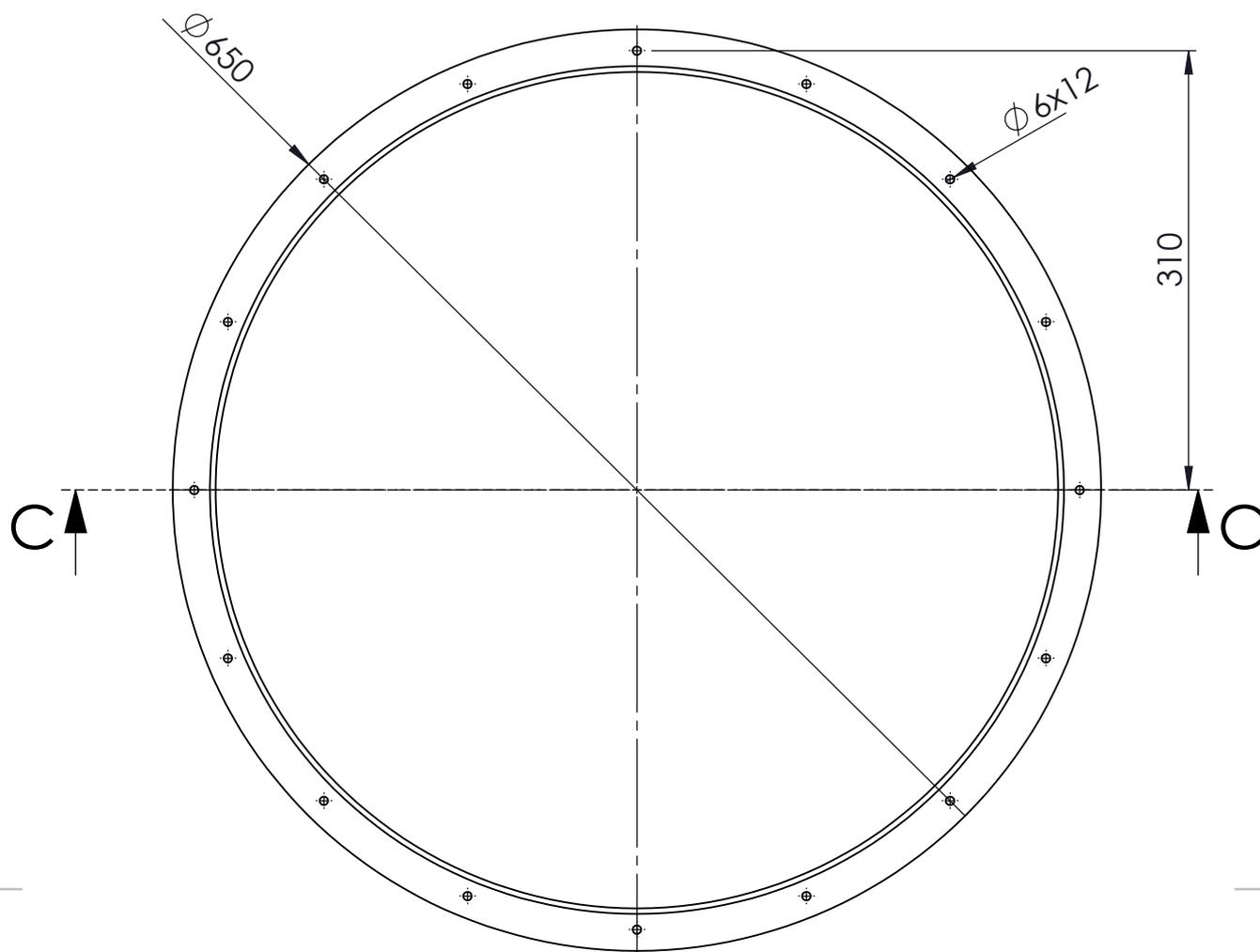


INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS
 INSTRUMENTACIÓN
 DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

ESCALA:
1:5

ARO_VACIO_2

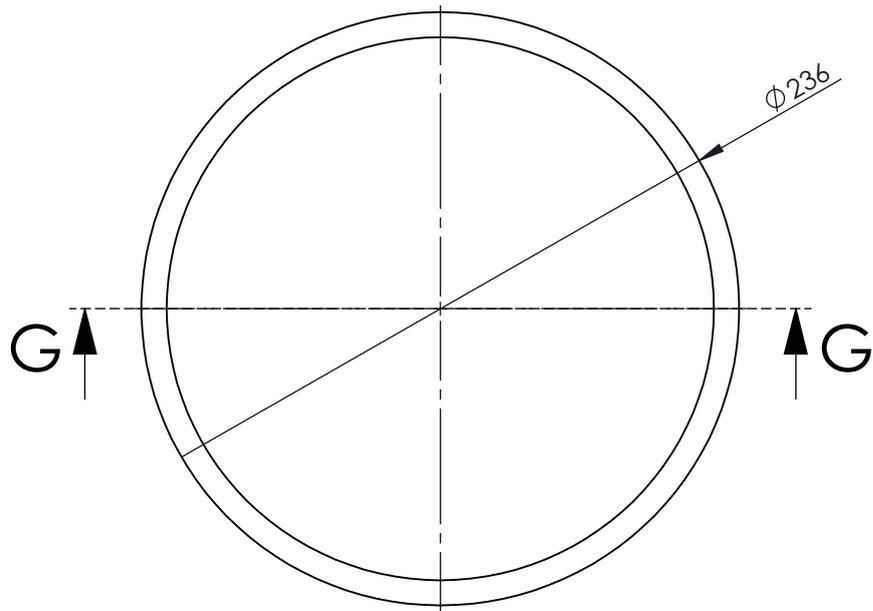
MATERIAL: ALUMINIO 6082
 MASA: 3,04 kg



SECCIÓN C-C

MFIS

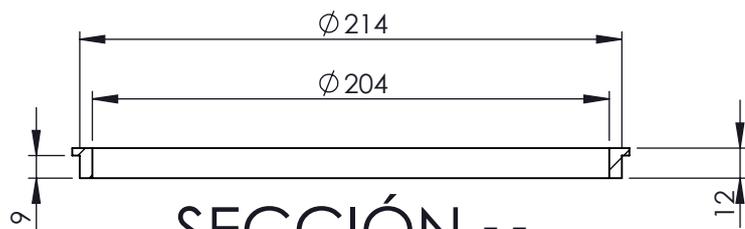
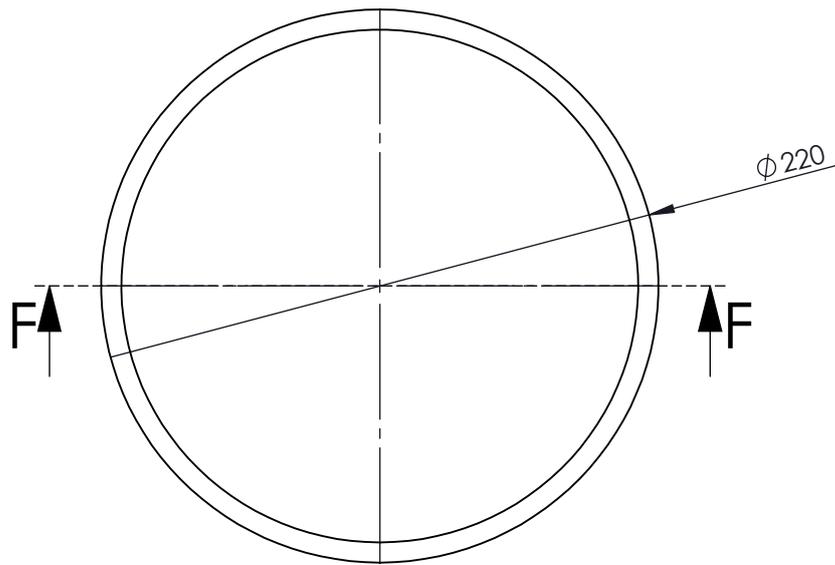
Nombre		Fecha	Autor		INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS INSTRUMENTACIÓN DEPARTAMENTO DE MECÁNICA
Apellidos		03/05/16	Adrian		
Id. s. normas		UNE-EN-DIN	Lorenzo Rodr.		
ESCALA:	ARO_VACIO_1			MATERIAL:	ALUMINIO 6082
1:5				MASA:	3,04 kg



SECCIÓN G-G

MFIS

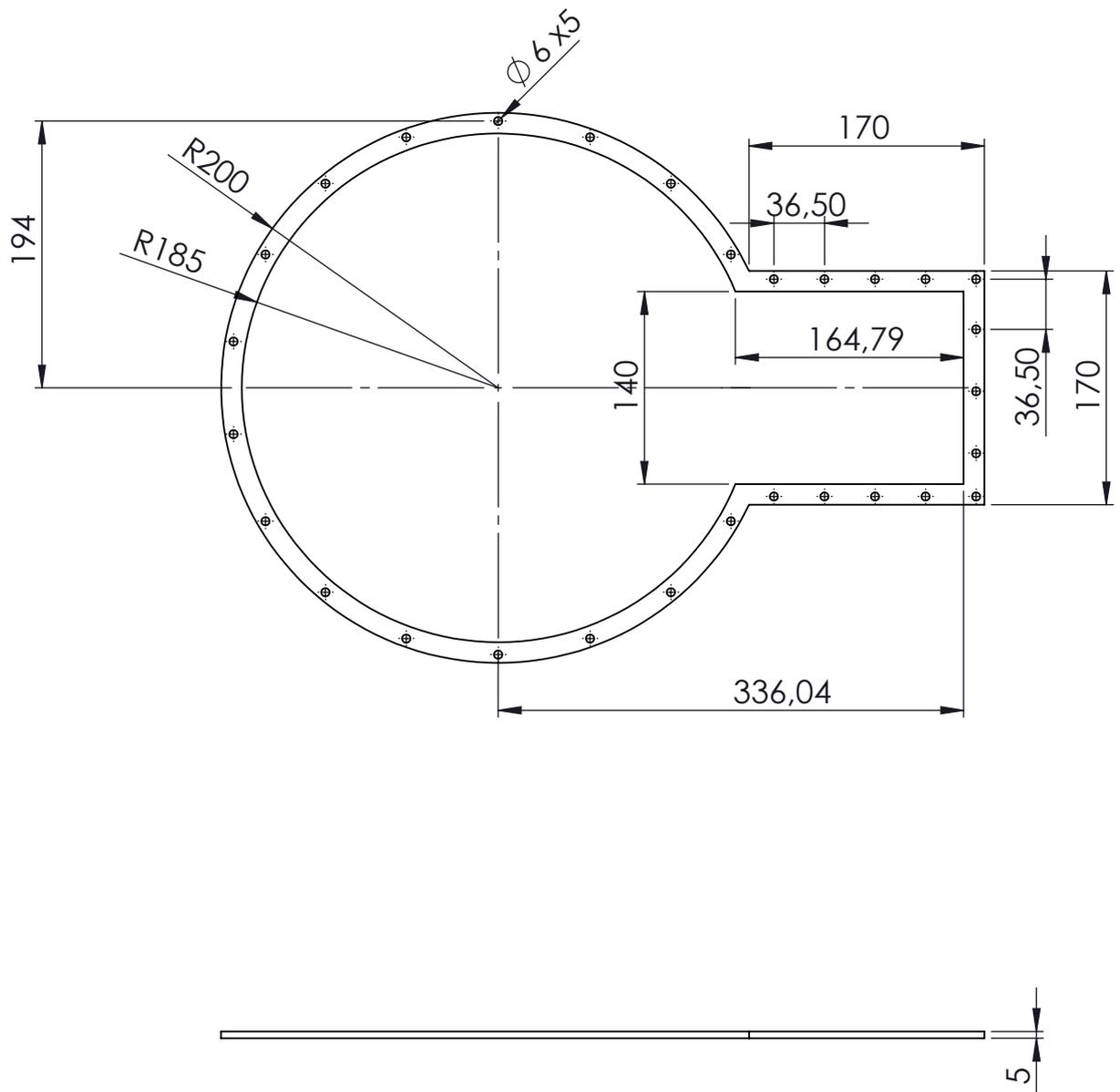
	Fecha	Autor		INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS INSTRUMENTACIÓN DEPARTAMENTO DE MECÁNICA
Nombre	03/05/16	Adrian		
Apellidos		Lorenzo Rodr.		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN			
ESCALA: 1:3	ARO_TAPA_SHIELD_50K			MATERIAL: ALUMINIO 6082 MASA: 0,15 kg



SECCIÓN F-F

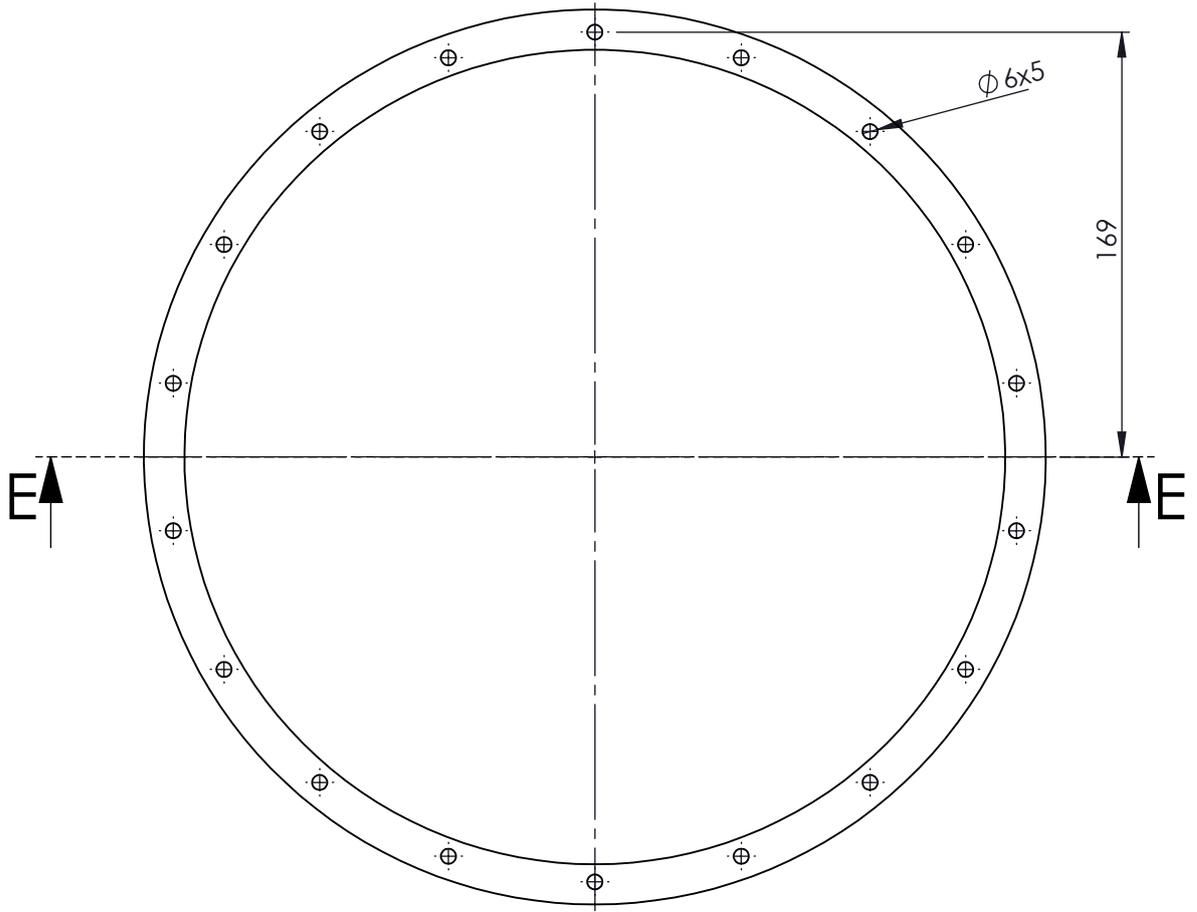
MFIS

Fecha		Autor			INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS INSTRUMENTACIÓN DEPARTAMENTO DE MECÁNICA	
Nombre		Adrian				
Apellidos		Lorenzo Rodr.				
Id. s. normas		UNE-EN-DIN				
ESCALA:		ARO_TAPA_SHIELD_20K			MATERIAL:	
1:3					MASA:	
					0,12 kg	



MFIS

Nombre		Fecha	Autor		INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS INSTRUMENTACIÓN DEPARTAMENTO DE MECÁNICA
Apellidos		03/05/16	Adrian		
Id. s. normas			Lorenzo Rodr.		
ESCALA:		UNE-EN-DIN			
1:5		ARO_BASE_SHIELD_50K			MATERIAL: ALUMINIO 6082 MASA: 0,3 kg



SECCIÓN E-E

MFIS

	Fecha	Autor
Nombre	03/05/16	Adrian
Apellidos		Lorenzo Rodr.
Id. s. normas	UNE-EN-DIN	



INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS
 INSTRUMENTACIÓN
 DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

ESCALA:
 1:3

ARO_BASE_SHIELD_20K

MATERIAL: ALUMINIO 6082
 MASA: 0,22 kg