

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Diseño de un sistema para coevaporación física en una cámara de alto vacío



Grado en Ingeniería en Diseño Mecánico

Trabajo Fin de Grado

Aitor Arano Sastre

Ricardo Ortega Hertogs

Tudela, 22 de junio de 2015



AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no habría sido posible sin la influencia directa o indirecta de muchas personas a las que agradezco profundamente por estar presentes en las distintas etapas de su elaboración, así como en el resto de mi vida.

Mi más sincero agradecimiento al profesor Ricardo Ortega Hertogs por todo el conocimiento que me ha aportado durante estos meses; por su confianza, colaboración y apoyo en todo momento.

A todos los docentes de la Universidad Pública de Navarra que compartieron sus conocimientos, dentro y fuera de clase, haciendo posible que mí formación profesional se resumiera en satisfacciones académicas e inquietudes insatisfechas en continuo crecimiento.

A mis amigos y compañeros. Quienes trabajaron conmigo hombro a hombro durante estos años poniendo lo mejor de su energía y empeño por el bien de nuestra formación profesional, y sobre todo a quienes compartieron su confianza, tiempo, y los mejores momentos que he vivido durante esta etapa como estudiante, dentro y fuera del campus.

La experiencia vivida en el laboratorio ha sido enriquecedora en todos los sentidos. Desde el primer momento he aprendido a alegrarme por pequeños logros que permitían el avance del proyecto.

También quiero agradecer a mi familia toda la paciencia y el apoyo que me han brindado durante estos años, ya que han hecho posible mi sueño de ser Ingeniero depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudarlo ni un solo momento.

Y por último pero no menos importante quiero agradecer a Virginia, una persona indispensable por estar siempre a mi lado; por su comprensión y paciencia, dándome ánimos de fuerza y valor para seguir adelante.

A todos, gracias.

RESUMEN

El proyecto es el diseño de un sistema para la coevaporación de materiales en una cámara de alto vacío y su condensación en forma de película sólida en sustratos apropiados (deposición en fase vapor, PVD). Mediante un sistema de tipo carrusel puede seleccionarse el material a evaporar de entre 8 posibles.

El proceso de evaporación se realiza bien mediante corrientes eléctricas calefactoras a través de filamentos de tungsteno o botes de tántalo o de molibdeno, o bien mediante radiación de microondas, absorbidas por crisoles adecuados en los que se alojan los materiales a evaporar. El material en fase vapor atraviesa un sistema de máscaras de sombra que permite la deposición del material sobre el sustrato en diferentes geometrías de tamaño milimétrico. Este sistema permite la selección de la máscara apropiada, que se posiciona de manera automatizada bajo el sustrato. El sustrato está alojado en un porta-sustratos intercambiable, de fácil inserción en el sistema, cuya temperatura puede regularse desde $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, mediante un reservorio de nitrógeno líquido, hasta $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, mediante calentamiento por radiación.

Un obturador rotatorio a modo de disco con sectores de diferente apertura, ubicado entre la fuente de vapor y el sustrato, permite variar el espesor de la película en diferentes zonas del sustrato. El sistema está diseñado para poder aprovisionar el mismo con medidores de espesor (cristal de cuarzo) para monitorizar el ritmo de crecimiento y el espesor de la película.

PALABRAS CLAVE

Vacío, deposición de materiales, coevaporación, máscaras de sombra, microondas

ÍNDICE

ANTECEDENTES	1
1. Introducción al vacío.....	1
1.1. Natural.....	1
1.2. Artificial	3
1.3. Campos de aplicación.....	4
2. Tecnología de alto vacío	6
2.1. Fundamentos de vacío.....	6
2.1.1. Estados físicos de la materia	6
2.1.2. Cambios de fase	6
2.1.3. Diagramas <i>P-T</i>	8
2.2. Generalidades de los gases.....	9
2.2.1. Ley general de los gases.....	9
2.2.2. Densidad molecular.....	10
2.2.3. Regímenes de flujo.....	11
2.2.4. Recorrido libre medio (<i>Mean Free Path</i>).....	13
2.2.5. Tiempo de formación de una monocapa	14
2.2.6. Distancia promedio entre partículas	15
2.3. Criterio de selección de materiales.....	16
2.3.1. Requerimientos.....	16
2.3.2. Plásticos en vacío	18
2.4. Técnicas de limpieza	18
2.4.1. Limpieza del Tántalo y del Titanio	18
2.4.2. Limpieza del sustrato	19
2.5. Técnicas de sellado.....	19
2.6. Detección de fugas	19
2.6.1. Localización de fugas.....	20
2.6.2. Medida de fugas	20
2.7. Reglas de operación en sistemas de vacío.....	21
3. Fenómenos físico-químicos en técnicas de vacío.....	22
3.1. Evaporación-Condensación.....	22
3.1.1. Vapor en sistemas de vacío	22
3.1.2. Presión de vapor y velocidad de evaporación	22
3.2. Desorción	23

3.2.1.	Fenómeno	23
3.2.2.	Degasificación (Outgassing)	24
4.	Producción de bajas presiones.....	24
4.1.	Parámetros y principios de bombeo	24
4.2.	Bombas de vacío	26
4.2.1.	Bombas mecánicas	26
4.2.2.	Bomba turbomolecular.....	28
4.2.3.	Bomba de ionización.....	29
4.2.4.	Bombas criogénicas.....	30
5.	Medición de bajas presiones	31
5.1.	Clasificación de medidores	31
5.2.	Medidores mecánicos.....	32
5.2.1.	Medidor de Bourdon	32
5.2.2.	Medidor de diafragma	32
5.3.	Medidores de conductividad térmica	33
5.4.	Medidores por ionización.....	33
6.	Dispositivos de vacío	34
6.1.	Válvulas.....	34
6.2.	Pasamuros (<i>feedthroughs</i>).....	34
7.	Evaporación de materiales	35
7.1.	Métodos de calentamiento.....	35
7.1.1.	Resistivo.....	35
7.1.2.	Fuentes de deposición por pulso láser (<i>PLD</i>).....	36
	DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	37
8.	Objetivo del proyecto	37
9.	Elementos base de nuestro sistema	38
9.1.	Collares	38
9.2.	Cubiertas	40
9.3.	Juntas y abrazaderas	41
9.4.	Bombas.....	43
9.5.	Medidores de presión	45
9.6.	Regulador de flujo.....	46
9.7.	Conjunto de la cámara de vacío	46
10.	Puesta a punto de la cámara	47
10.1.	Comprobación de la presión última de las bombas	48
10.1.1.	Bomba seca	48

10.1.2.	Bomba turbomolecular	48
10.1.3.	Bomba de ionización	48
10.2.	Búsqueda de fugas.....	49
10.3.	Limpieza de los componentes	51
10.4.	Degasificación de los elementos	52
11.	Diseño del sistema de deposición de materiales	53
11.1.	Diseño de la zona baja.....	53
11.1.1.	Objetivo.....	53
11.1.2.	Mecanismo	54
11.1.3.	Carrusel fijo.....	57
11.1.4.	Carrusel móvil	58
11.1.5.	Sistemas de evaporación	59
11.2.	Diseño de la zona alta.....	62
11.2.1.	Reservorio y calefactor.....	63
11.2.2.	Sistema base	66
11.2.3.	Sistema de máscaras de sombra	68
11.2.4.	Obturador rotatorio.....	71
11.3.	Conjunto de cámara de vacío y sistema de evaporación física	73
12.	Conclusiones	75
	BIBLIOGRAFÍA	76
	ANEXO I	77

ANTECEDENTES

1. Introducción al vacío

Aunque la palabra vacío indique la inexistencia de materia en un cierto volumen, el objetivo de las técnicas del vacío está muy lejos de esa definición. La presión más baja que se ha alcanzado con los métodos de bombeo más modernos es de unos cientos de moléculas por cada cm^3 .

Según la definición de la *American Vacuum Society* (Roth, 1990) el término de vacío se refiere a un cierto espacio lleno de un gas a una presión menor que la atmosférica, es decir, tener una densidad de moléculas menor que $2,5 \cdot 10^{19}$ moléculas/ cm^3 .

1.1. Natural

En la tierra, la presión atmosférica a nivel del mar es de 760 torr (1 atmósfera), que es debida a la columna atmosférica de gas superior. Esta presión va decreciendo con la altitud, dado que la presión se debe al peso del aire que queda por encima de la posición ocupada, cuanto más altura logramos menor es dicha columna de gas, y por tanto, menor es el volumen de gas superior. Al disminuir la presión ocurren diferentes fenómenos con las partículas del aire, variando la concentración de cada elemento.

La principal forma para clasificar el grado de vacío de un sistema es la medición de la presión absoluta. Pero definir los límites de cada región varía según los autores. En este trabajo se dividen en bajo, alto y ultra alto vacío, correspondientes a las regiones principales de la Figura 1.1.

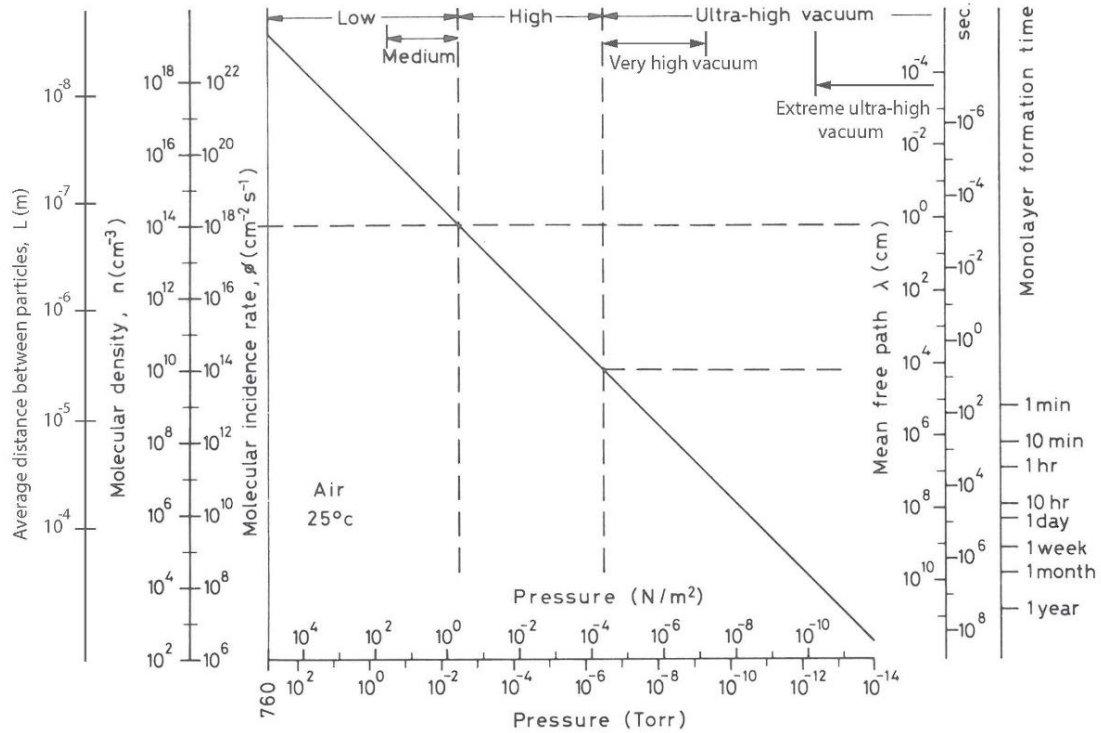


Figura 1.1 Relación de diferentes conceptos que definen el grado de vacío (Roth, 1990)

Definimos la gravedad efectiva, g_{ef} , como la aceleración constante debida a la fuerza gravitacional que existe en la superficie terrestre. Utilizando la constante de gravitación universal ($G = 6,67259 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$), la masa de la Tierra ($M_T = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$) y el radio medio de la Tierra ($R_T = 6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$), el valor resultante de la gravedad efectiva es

$$g_{ef} = G \cdot \frac{M_T}{R_T^2}$$

$$= 9,83 \text{ N/kg}$$

Al incrementar la altitud, y alejarnos de la superficie terrestre, la distancia al centro de la tierra aumenta. Por tanto, la gravedad instantánea, g , depende de la altitud h (altura desde el nivel del mar) de la siguiente forma

$$g = G \cdot \frac{M_T}{(R_T + h)^2}$$

Realizando una relación entre la gravedad efectiva y la gravedad instantánea, obtenemos

$$\frac{g}{g_{ef}} = \frac{G \cdot \frac{M_T}{(R_T + h)^2}}{G \cdot \frac{M_T}{R_T^2}}$$

$$= \frac{R_T^2}{(R_T + h)^2}$$

Resolviendo esta ecuación para ciertos valores de altitud se obtiene la Tabla 1.1, donde se ve reflejada la variación de la acción gravitatoria terrestre. Podemos hacernos una idea de la influencia de las distancias en la gravedad, teniendo en cuenta que la luna se encuentra a una distancia de $3,844 \cdot 10^5$ km respecto al centro de la tierra.

Altitud h (Km)	g/g_{ef}
10^0	0,9997
10^1	0,9969
10^2	0,9693
10^3	0,7470
10^4	0,1514
10^5	0,0036

Tabla 10.1 Relación entre la gravedad efectiva y la gravedad instantánea

En la naturaleza se pueden observar técnicas de vacío en algunas funciones de la vida cotidiana de ciertos animales, pero no se conoce ninguna que haga uso de un ultra alto vacío. Algunas de estas aplicaciones son vitales, como la respiración propia, los humanos, por ejemplo, logramos una diferencia de presión en nuestros pulmones de hasta 300 torr en la succión.

1.2. Artificial

Para cada región de presiones se utilizan unos tipos específicos de bombas e instrumentos de medida. De hecho, cada uno de estos rangos de vacío corresponde a un estado físico del gas diferente. Para definir estos estados es necesario definir conceptos que dependen del tipo de gas y de la temperatura. Estos son los siguientes: densidad molecular, recorrido libre medio, tiempo de formación de una monocapa y distancia promedio entre partículas, que veremos más extensamente en el apartado 2.2.

Es interesante saber la composición del aire, ya que al variar su presión, la presión parcial de cada componente no es la misma. En la Tabla 1.2 se puede observar cómo varían los porcentajes de cada componente del aire según la presión. Se puede observar que el hidrógeno y el helio son los componentes más mayoritarios a bajas presiones, dado que su radio molecular es notoriamente más pequeño que los demás y por tanto tienen más facilidad para entrar dentro de la cámara a través de los intersticios de las juntas o permear a través del propio material.

Component	Atmosphere ⁽¹⁾		Ultra-high vacuum	
	Percent by volume	Partial pressure Torr	(2) Partial pressure Torr	(3)
N ₂	78.08	5.95×10^2	2×10^{-11}	—
O ₂	20.95	1.59×10^2	—	3×10^{-13}
Ar	0.93	7.05	6×10^{-12}	—
CO ₂	0.033	2.5×10^{-1}	6.5×10^{-11}	6×10^{-12}
Ne	1.8×10^{-3}	1.4×10^{-2}	5.2×10^{-11}	—
He	5.24×10^{-4}	4×10^{-3}	3.6×10^{-1}	—
Kr	1.1×10^{-4}	8.4×10^{-4}	—	—
H ₂	5.0×10^{-5}	3.8×10^{-4}	1.79×10^{-9}	2×10^{-11}
Xe	8.7×10^{-6}	6.6×10^{-5}	—	—
H ₂ O	1.57	1.19×10^1	1.25×10^{-10}	9×10^{-13}
CH ₄	2×10^{-4}	1.5×10^{-3}	7.1×10^{-11}	3×10^{-13}
O ₃	7×10^{-6}	5.3×10^{-5}	—	—
N ₂ O	5×10^{-5}	3.8×10^{-4}	—	—
CO	—	—	1.4×10^{-10}	9×10^{-12}

Tabla 1.02 Porcentaje del volumen ocupado por los diferentes componentes del aire a presión atmosférica y a ultra alto vacío (Roth, 1990)

1.3. Campos de aplicación

Las aplicaciones de vacío pueden ser clasificadas en una gran variedad según la situación física lograda por técnicas de vacío o según los campos a los que pertenecen. Obviamente cada aplicación usa uno o más estados físicos del gas que se utilizan para obtener productos o facilidades a la hora de realizar alguna operación. A continuación, se explican los principios de vacío más utilizados y en el campo de aplicación que se utilizan.

- Baja presión

Se pretende lograr una diferencia de presión por la evacuación del gas de un recipiente, dando lugar a presiones del orden de 1 kg/cm^2 en las paredes. Estas fuerzas se pueden usar para el atrapado o la elevación de ciertos sólidos, para el transporte de sólidos y líquidos, o para el conformado de objetos.

- Baja densidad molecular

Se pueden eliminar constituyentes atmosféricos activos, debido a las reacciones que pueden tener algunos componentes con el aire. Se necesita extraer de un recipiente los constituyentes del aire (como oxígeno o vapor de agua), y se rellena de un gas inerte o dejarlo en alto vacío. Se utiliza en lámparas fluorescentes, para evitar la oxidación en los procesos de fusión, para proteger a los alimentos o materiales sensibles de la reacción con componentes atmosféricos, o en la encapsulación de ciertos dispositivos (como capacitores o transistores).

Se elimina el gas ocluido o disuelto, cuando se requiere eliminar la humedad o químicos de cierta comida, o eliminar gases disueltos de aceites o plásticos. Con el secado por congelación se enfría el producto para posteriormente evaporar el agua por

sublimación. Con el proceso de impregnación, en cambio, se elimina la humedad o gas ocluido y se sustituye por otra sustancia.

Se disminuye la energía de transferencia, ya que el alto vacío es un buen aislante térmico y eléctrico. Esta propiedad se usa en los frascos *Dewar* que se usan para el almacenamiento de aire, nitrógeno o helio líquido. Estos frascos tienen una doble pared, y entre medio se realiza un alto vacío para evitar dichas transmisiones. También se usan en dispositivos de alta tensión como los aceleradores de partículas. Se utiliza en simulaciones espaciales, dado que en el espacio la transferencia de energía es similar a la que ocurre en un sistema de ultra alto vacío en la Tierra.

- Gran recorrido libre medio

Se evitan colisiones entre moléculas, electrones e iones, y se aumenta el recorrido libre medio, cuando se requiere que estas partículas pierdan la menor energía posible. Se suele usar en tubos de electrones, en fotocélulas, en tubos de rayos catódicos, en tubos de rayos X, en aceleradores de partículas, en espectrómetros de masa, en microscopios de electrones, etc. Se usa la misma propiedad en plantas de recubrimiento en vacío, ya que se pretende que el material evaporado tenga las mínimas colisiones posibles hasta que llegue al sustrato, viajando en líneas rectas. Así se pueden depositar películas delgadas en dispositivos ópticos.

- Elevado tiempo de formación de una monocapa

Cuando se pretende lograr superficies limpias, para poder estudiar las propiedades reales de las superficies (fricción y adhesión), a bajas presiones el tiempo de formación de una monocapa es lo suficientemente bajo.

2. Tecnología de alto vacío

En esta sección, estudiaremos los conocimientos básicos sobre el vacío, así como las propiedades más relevantes de los gases. Se explicarán brevemente los cambios de fase de los materiales y el modo de operación cuanto nos encontramos en un entorno de vacío o alto vacío.

2.1. Fundamentos de vacío

2.1.1. Estados físicos de la materia

Pueden existir diferentes estados dependiendo de las fuerzas intermoleculares y de la energía cinética promedio (temperatura) de las moléculas, separándose en estado sólido, líquido o gas. El modelo de estado del gas en el que las moléculas son más independientes entre sí se utiliza para representar un gas ideal. Este es un concepto teórico que corresponde a asumir las siguientes características:

- Los átomos se consideran como esferas
- Su volumen es muy pequeño comparado con el que ocupa el gas actualmente
- Las moléculas no ejercen fuerzas entre ellas
- Viajan de forma rectilínea aleatoriamente
- Las moléculas tienen colisiones elásticas perfectas

Algunos gases reales como el hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, argón, helio, criptón, neón y el xenón, a presiones ambientales, tienen un comportamiento muy parecido al de los gases ideales. A presiones menores otros gases adaptan el modelo de gas ideal.

En los gases reales las fuerzas intermoleculares no son despreciables y, conforme cambia la temperatura y la presión, sus propiedades varían.

2.1.2. Cambios de fase

En termodinámica una fase es un sistema o subsistema de composición química y estructura física homogéneas, limitado por una superficie ficticia a través de la cual las propiedades físicas cambian bruscamente.

Cuando un sistema puede presentarse en dos fases distintas para diversos valores de presión y temperatura, es posible observar el paso de una fase a otra modificando continuamente el valor de los parámetros. Entonces se dice que hay un cambio de fase.

Un estudio de los cambios de fase de una sustancia exige un modelo tridimensional en donde la presión, el volumen específico y la temperatura se representan en coordenadas rectangulares. En estas coordenadas la ecuación de estado de una sustancia pura determina una superficie llamada superficie característica o superficie pVT del fluido. Cada estado de equilibrio de la sustancia corresponde a un punto de la superficie de coordenadas p , V y T . En la Figura 2.1.1 y la Figura 2.1.2 podemos observar la diferencia entre un gas ideal y una sustancia real.

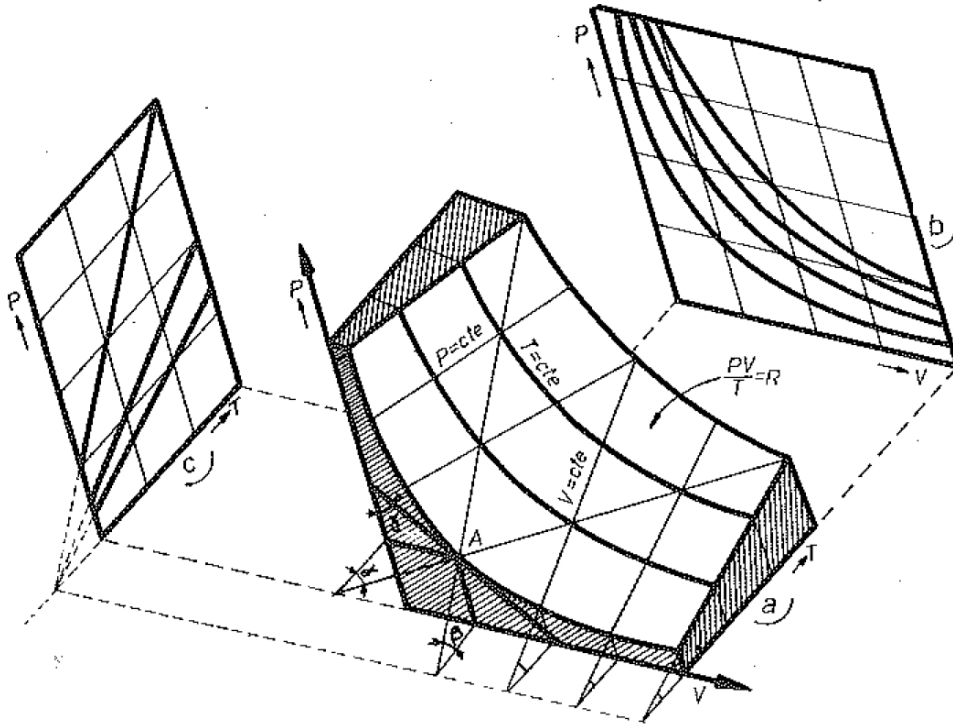


Figura 2.1.1 Superficie pVT característica de un gas ideal (Peris, 1984)

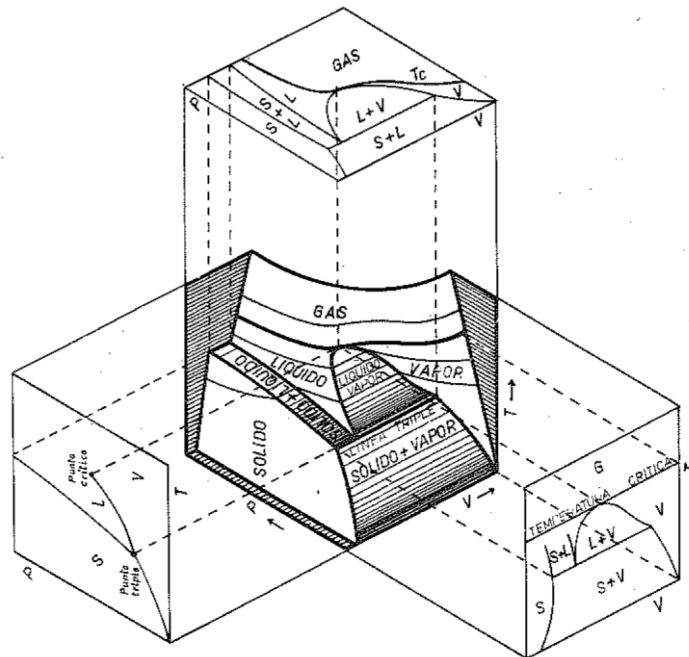


Figura 2.1.2 Superficie pVT de un cuerpo puro real (Peris, 1984)

2.1.3. Diagramas P - T

Si suponemos un espacio cerrado con un volumen constante, observamos como varía la presión del gas para cada temperatura. De esta forma podemos ver la presión de vapor de diferentes sustancias de forma gráfica con los diagramas P - T .

Por exponer dos metales de extremos opuestos, en la Figura 2.1.3 se han representado un material con baja presión de vapor como el tántalo, y otro con alta presión de vapor, el cadmio. Dado que la presión de vapor del tántalo es muy baja a altas temperaturas y bajas presiones, a la hora de hacer vacío no contribuirá a la degasificación (*outgassing*), ya que las moléculas no tendrán energía suficiente como para cambiar de fase a estado gaseoso. En el cadmio, en cambio, a una presión de 10^{-9} Pa sublimará (cambio de sólido a fase vapor) casi a temperatura ambiente (300 K).

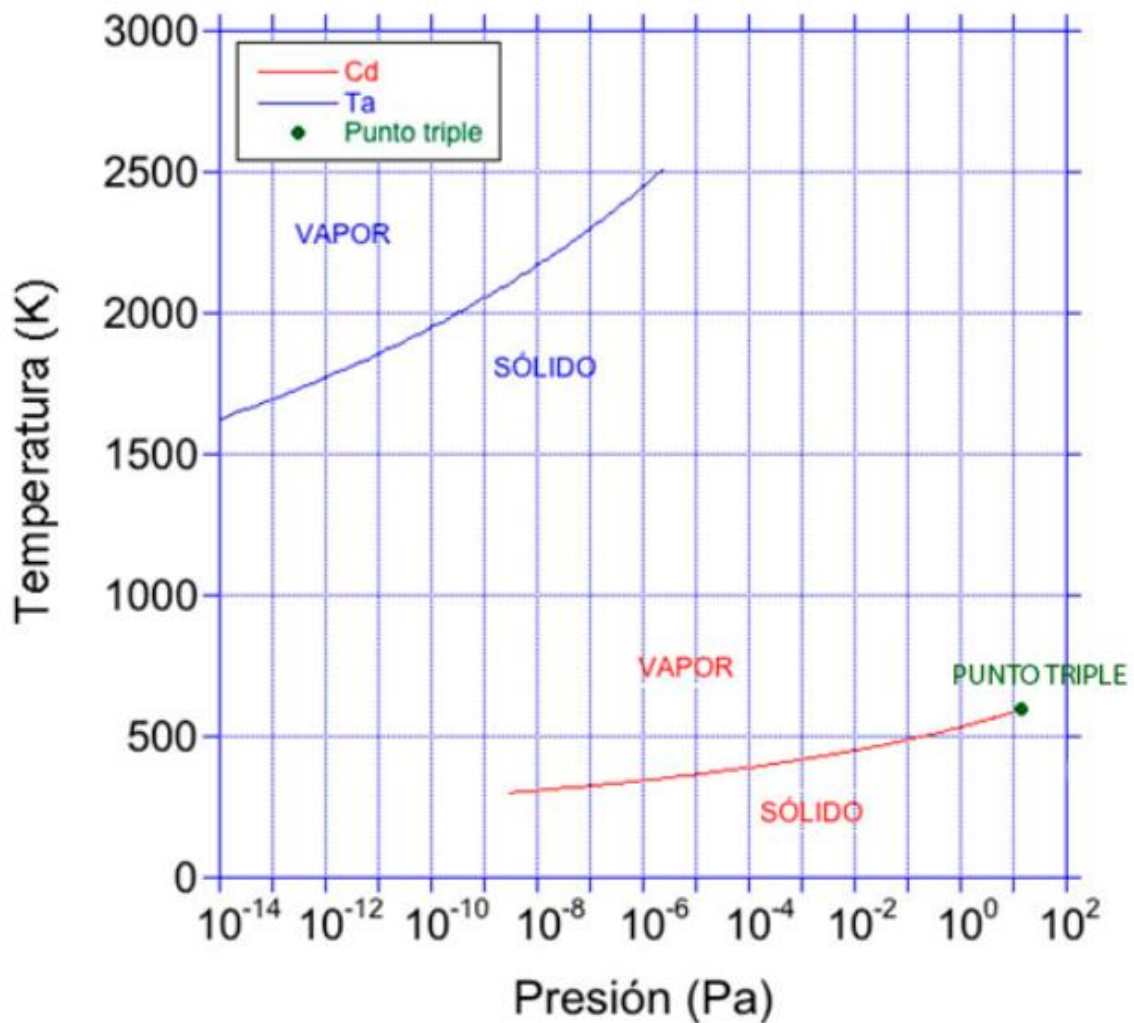


Figura 2.1.3 Presión de vapor de la sublimación del Cadmio y del Tántalo

2.2. Generalidades de los gases

2.2.1. Ley general de los gases

Para explicar generalmente la ley general de los gases se va a considerar un gas que en un instante específico tiene las propiedades termodinámicas P_0 , V_0 y T_0 . Para cambiar esas propiedades iniciales a otras, se realiza una expansión a presión constante hasta las coordenadas P_1 , V_1 y T_1 , y luego otra expansión a temperatura constante hasta el estado final (P_2 , V_2 y T_2). Si consideramos que $P_0 = P_1$ y que $T_1 = T_2$, combinando ambas fórmulas da como resultado

$$\frac{P_0 * V_0}{T_0} = \frac{P_1 * V_1}{T_1} = \frac{P_2 * V_2}{T_2}$$

Si consideramos que $P_0 = P_1$ y que $T_1 = T_2$, obtenemos que

$$V_1 = V_0 \left(\frac{T_1}{T_0} \right) = V_0 \left(\frac{T_2}{T_0} \right)$$

$$V_1 = V_0 \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = V_0 \left(\frac{P_2}{P_0} \right)$$

Y por tanto,

$$P_0 * \frac{V_0}{T_0} = P_2 * \frac{V_2}{T_2}$$

Como se observa, $P*V/T$ tiene un valor constante. Se consiguió definir la relación entre estas propiedades con el concepto del mol (n), y su valor es el mismo para cualquier gas ideal. Un mol es numéricamente igual al peso en gramos del peso molecular de una sustancia.

Avogadro demostró que la masa de un gas bajo las mismas condiciones de temperatura, presión y volumen contiene el mismo número de moléculas. Así, para un mol de gas se cumple la siguiente fórmula.

$$P * \frac{V}{T} = nR_0$$

Donde n el número de moles y R_0 es la constante universal de los gases, que según las unidades que se utilicen tienen los valores presentados en la tabla 2.2.1.

P	V	T	R_0
dyne/cm ²	cm ³	°K	8.314×10^7 erg/°K mole
Newton/m ²	m ³	°K	8.314 Joule/°K mole
Torr	cm ³	°K	6.236×10^4 Torr·cm ³ /°K mole
Torr	liter	°K	62.364 Torr·liter/°K mole
atm	cm ³	°K	82.057 atm·cm ³ /°K mole

Tabla 2.2.1 Valor numérico de R_0 para varios sistemas de unidades

2.2.2. Densidad molecular

El número de moléculas por mol es el número de Avogadro, N_A . Ya que este número determina la cantidad de partículas elementales que existen en un mol de cualquier sustancia. La densidad molecular se refiere a la cantidad de moléculas que existen en mol de una determinada sustancia. Para calcular dicho número se realizaron dos experimentos.

Uno por técnicas de rayos-X que determino exactamente la separación interatómica de los cristales sólidos. Teniendo en cuenta que la masa de un átomo de hidrógeno es $1,67 \times 10^{-24}$ g y el peso molecular del H₂ es 2,016g, resulto que

$$N_A = \frac{2.016}{2 * 1.67 * 10^{-24}} = 6,023 * 10^{23} \text{ molec/mol}$$

La segunda, fue resultado de una medida que realizó Faraday, utilizando la carga necesaria para depositar un mol de una sustancia cualquiera por electrólisis, que tiene un valor de $F = 96.488$ coulomb. Como se sabe que la carga de un electrón tiene el valor de $e^- = 1,602 \times 10^{-19}$ coulomb, resultó que

$$N_A = \frac{96.488}{1,602 * 10^{-19}} = 6,023 * 10^{23} \text{ molec./mol}$$

Estas ecuaciones dieron como resultado el número de moléculas por unidad de volumen, que es

$$\begin{aligned} n &= \left(\frac{W}{M}\right) * \left(\frac{N_A}{V}\right) \\ &= \left(\frac{N_A}{R_0}\right) * \left(\frac{P}{T}\right) \\ &= 9,656 * 10^{18} * \left(\frac{P}{T}\right) \end{aligned}$$

Donde W representa la masa en kg y M el peso molecular en kg/mol. En la expresión resultante, la presión P debe estar medida en torr, y la temperatura T en grados Kelvin.

2.2.3. Regímenes de flujo

Para definir los flujos, se consideran un número de secciones sucesivas 1, 2,..., n, de un sistema de conducción de flujo. A través de cada una de las secciones pasa el mismo flujo másico, que es proporcional a la cantidad de gas que fluye por unidad de tiempo, es decir, el *throughput* (caudal de gas) q_{pV} . Por tanto, suponiendo que se trata de un flujo isotérmico, se obtiene la ecuación de la continuidad

$$q_{pV} = p_1 * V_1 = p_2 * V_2 = \dots = p_n * V_n$$

Si un flujo de gas fluye a través de una tubería, resulta una diferencia de presión resultante $p_1 - p_2$, que es proporcional al flujo q_{pV} . A este factor de proporcionalidad se denomina resistencia R , y su relación es la siguiente

$$(p_1 - p_2) = R * q_{pV}$$

Esta relación se corresponde con la ley de Ohm, $V = I * R$, en electricidad. Por eso, para resolver sistemas complejos de tuberías o elementos de conducción, se utilizan semejanzas eléctricas. Donde

$$V \rightarrow p_1 - p_2$$

$$I \rightarrow q_{pV}$$

$$R \rightarrow \frac{1}{C} = C$$

El recíproco de la resistencia, $1/R$, se denomina conductancia C . Por lo tanto, para calcular sistemas con conexiones en serie se utiliza

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

Y en paralelo,

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

Los métodos para calcular la conductancia dependen de la presión media del gas. De hecho, a bajas presiones se aplican los métodos de la cinética del gas y, a altas presiones, en cambio, se aplican los métodos de la dinámica del gas.

Las cantidades características para los diferentes tipos de flujos de gas son el número de Reynolds (Re) y el número de Knudsen (Kn).

Una vez definidos los flujos, y la forma en la que interactúan con los diferentes medios de conducción, se distinguen tres principales regímenes de flujo: *viscoso*, *intermedio* y *molecular*.

● VISCOSO

Dentro de este tipo de flujo se distinguen otros dos:

– *Flujo turbulento*: Es el movimiento de un fluido que se da en forma caótica, en el que las partículas se mueven desordenadamente y las trayectorias de las partículas se encuentran formando pequeños remolinos periódicos. El flujo laminar aparece muy aplanado, ya que la capa límite del flujo laminar se forma muy cerca de las paredes. El flujo turbulento no suele ocurrir en el centro del medio de conducción, ni en rangos de alto vacío.

– *Flujo laminar*: Predomina cuando varias capas de diferentes velocidades se deslizan unas sobre otras en el medio de transmisión, sin una mezcla turbulenta perpendicular a la dirección del flujo. El flujo laminar a través de una tubería larga de sección circular forma un perfil de velocidad parabólico (Flujo de Poiseuille).

A altas presiones, se debe distinguir entre flujo turbulento o laminar. Uno de los dos tipos de flujo es predominante y depende de la velocidad del flujo, del diámetro del conducto, de la densidad y de la viscosidad dinámica del medio que fluye. El resultado de estos factores es el número de Reynolds, una cantidad adimensional característica de la naturaleza del flujo de cada gas. Este se obtiene de la siguiente manera

$$Re = \frac{c * d * \eta}{\delta}$$

c = velocidad del flujo

d = diámetro característico del sistema de conducción en la dirección del flujo

δ = densidad

η = viscosidad dinámica

La relación entre la viscosidad cinemática y la viscosidad dinámica depende de la densidad según la siguiente fórmula

$$\text{viscosidad dinámica (Pa * s)} = \text{viscosidad cinemática/densidad}$$

$$v = \frac{\eta}{\delta}$$

● Molecular

El flujo molecular, basado en consideraciones cinéticas del gas, asume que a bajas presiones, el recorrido libre medio de las moléculas es mayor que la normal en la dirección del flujo del sistema de conducción o del elemento. Knudsen asumió que, como la presión disminuye, las interacciones (colisiones) de las partículas de gas unas con otras se convierten en insignificantes y el tipo de flujo se determina por las interacciones de las partículas del gas con las paredes circundantes. El número característico para el flujo molecular es el número de Knudsen, dado por:

$$Kn = \frac{\lambda}{d}$$

λ = recorrido libre medio

d = dimensión característica del elemento de conducción (como el diámetro interior)

● Intermedio (Flujo de Knudsen)

Esta región de transición entre flujo viscoso y molecular es caracterizado por el número de Knudsen $10^{-2} < Kn < 0,5$. En esta región se obtienen condiciones de flujo intermedio.

Los tipos de flujos para los diferentes rangos de presión se observan en la tabla 2.2.3.

Bajo vacío	Vacío medio	Alto o ultra alto vacío
Flujo viscoso	Flujo intermedio	Flujo molecular
$p*d > 0,6 \text{ Pa*m}$	$0,6 \text{ Pa*m} > p*d > 10^{-2} \text{ Pa*m}$	$p*d < 10^{-2} \text{ Pa*m}$
$p*d > 0,6 \text{ mbar*cm}$	$0,6 \text{ mbar*cm} > p*d > 10^{-2} \text{ mbar*cm}$	$p*d < 10^{-2} \text{ mbar*cm}$
$Kn < 10^{-2}$	$10^{-2} < Kn < 0,5$	$Kn > 0,5$
$Re < 2.3000$ laminar		
$Re > 4.000$ turbulento		

Tabla 2.3.3 Características de los diferentes rangos de presión (LEYBOLD S.A.)

2.2.4. Recorrido libre medio (*Mean Free Path*)

En los movimientos de azar a distintas velocidades que tienen lugar en el interior del gas, las distancias recorridas por una molécula entre colisiones sucesivas no son constantes. Sin embargo, el valor medio λ de un gran número de estas distancias es una característica importante, y se le denomina recorrido libre medio (*Mean Free Path*). En el caso de gases ideales se considera que la molécula tiene un volumen finito y es una esfera sólida de radio R .

Para esta deducción, se supone que en un momento determinado todas las moléculas de gas quedan en reposo excepto una, que sigue moviéndose a una velocidad media \bar{v} . Cuando en su movimiento sufre una colisión con otra molécula, sus centros quedan separados por una distancia $d=2R$, siendo R el radio molecular. Es decir, es como si la molécula móvil tuviera un radio d y las moléculas en reposo fuesen puntos geométricos.

Teniendo esto en cuenta, durante un tiempo t la molécula habrá barrido un volumen de $\pi d^2 * \bar{v}t$ y habrá sufrido choques con todas las moléculas obtenidas en su interior. Si el número de moléculas por unidad de volumen es n , el número total de choques será $n * \pi d^2 * \bar{v}t$ y el recorrido libre medio será:

$$\lambda = \frac{\text{distancia recorrida}}{\text{número de choques}}$$

$$= \frac{\bar{v}t}{n * \pi d^2 * \bar{v}t} = \frac{1}{n * \pi d^2}$$

$$= \frac{1}{n\sigma}$$

Donde σ es denominada sección eficaz, y corresponde a $\sigma = \pi d^2$.

Si se considera que en cada choque la molécula cuya velocidad es \bar{v} posee una velocidad relativa \bar{v}_r respecto a la molécula que colisiona, que no está realmente en reposo. La ecuación queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{\bar{v}t}{n * \pi d^2 * \bar{v}_r t} \\ &= \frac{\bar{v}}{\bar{v}_r} \frac{1}{n\sigma}\end{aligned}$$

Si los vectores de velocidad de las moléculas que chocan son \vec{v} y \vec{v}' , la velocidad relativa será v_r , y por tanto,

$$\vec{v}_r^2 = \vec{v}^2 + \vec{v}'^2 - 2vv' * \cos\phi$$

Tomando la media de ambos miembros $vv' * \cos\phi = 0$ (dado que el coseno del ángulo que forman los dos vectores de velocidad, tiene la misma probabilidad de ser positivo que negativo y por tanto, su valor medio es nulo). Despreciando la diferencia entre la media cuadrática y el cuadrado de la media, nos queda $\bar{v}_r = \sqrt{2}\bar{v}$. Y por tanto, el recorrido libre medio se define por

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}n\sigma}$$

2.2.5. Tiempo de formación de una monocapa

Para realizar un dispositivo en el que se quiera lograr un espesor exacto de materiales, es necesario determinar el tiempo que debe estar abierto el substrato al sistema de evaporación de materiales.

El tiempo para saturar una superficie con una única capa de moléculas es función del tamaño molecular y de la velocidad de llegada molecular denominada Γ . Asumiendo que cada partícula penetra y ocupa un área de superficie d_0^2 , el tiempo para formar una monocapa es

$$t_{ml} = \frac{1}{\Gamma d_0^2} = \frac{4}{nvd_0^2}$$

A temperatura ambiente, se forma una monocapa de aire ($d_0 = 0,372$ nm, $v = 467$ m/s) en 2,5 segundos a una presión de 10^{-4} Pa. De esta forma, se puede determinar el tiempo necesario para la formación de una monocapa según el rango de presiones en el que nos encontremos.

2.2.6. Distancia promedio entre partículas

Con el fin de obtener una idea más sencilla del estado de las moléculas de gas, se introduce una nueva propiedad que se ha denominado distancia promedio entre partículas. Para ello, se supone que las partículas están en una posición estacionaria en el espacio, la distancia promedio entre partículas es el valor promedio media de las distancias mínimas entre dos partículas adyacentes. Partiendo de la ecuación de estado de un gas ideal:

$$pV = nRT$$

Y de la relación de Boltzmann

$$k_B = \frac{N}{R_A}$$

Sabemos que el número de moles es,

$$n = \frac{m}{W} = \frac{N}{N_A}$$

Dado que el número de Avogadro establece conexión entre la constante de los gases R y la constante de Boltzmann k_B , introduciendo la constante de los gases R en ambos lados de la ecuación se obtiene:

$$nR = N * k_B = \frac{R * N}{N_A}$$

Sustituyendo en la ecuación de estado nR por $(R * N)/N_A$ obtenemos,

$$pV = \frac{R}{N_A} * N * T$$

Desarrollando estas ecuaciones resulta que la distancia promedio entre partículas es

$$L = \left(\frac{V}{N}\right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{R}{N_A}\right)^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{T}{P}\right)^{\frac{1}{3}} L = k_B^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{T}{P}\right)^{\frac{1}{3}}$$

A una temperatura constante de $T=273$ K, por ejemplo, la distancia media entre partículas es

$$L(m) \cong 3.046 * 10^3 \left[p(Pa)^{-\frac{1}{3}} \right]$$

2.3. Criterio de selección de materiales

2.3.1. Requerimientos

En un examen superficial de los sistemas de alto o ultra alto vacío, percibimos que las superficies están limpias y pulidas. Una investigación más cerrada revela que estos materiales tienen muchos requerimientos en ambientes de vacío, y estos requerimientos a veces son incompatibles.

Los metales se suelen usar como paredes de las cámaras, y deben ser fácilmente moldeables y sellables. También deben tener una permeabilidad muy baja a los gases atmosféricos, una velocidad de *outgassing* muy baja, y una presión de vapor baja. Se suelen usar en elementos de diferentes dispositivos, como filamentos, campos de radiación, pozos térmicos, etc.

La mayoría de los plásticos tienen una alta presión de vapor, lo que significa que degasifican a una presión relativamente baja, pero también lo tienen ciertos metales. El Zinc y el Cadmio son de los peores, el Zinc especialmente tiende a contaminar los cátodos o cualquier otra superficie de alta tensión.

Las soldaduras más comunes contienen cinc y cadmio, por esta razón, no debemos usar aleaciones de soldadura inapropiadas. Existen aleaciones disponibles para alto vacío que operan igual de bien y no contaminan el sistema de trabajo. La eutéctica plata-cobre es excelente y tiene una alta temperatura de evaporación de 778 °C, pero se debe usar una llama soldadora de argón y helio.

Los vidrios son materiales inorgánicos que solidifican sin cristalizar, es decir, amorfos. El vidrio más común usado en la tecnología del vacío está formado por una base de óxido de silicio con otros óxidos, según las propiedades con las que se le quiera dotar. En la tabla 2.3.1 podemos observar diferentes vidrios que se usan en aplicaciones de vacío.

Property	Fused Silica	Pyrex 7740	7720 ^a	Soda 7052 ^a	0080	Lead 0120
Composition						
SiO ₂	100	81	73	65	73	56
B ₂ O ₃		13	15	18		
Na ₂ O		4	4	2	17	4
Al ₂ O ₃		2	2	7	1	2
K ₂ O				3		9
PbO			6			29
LiO				1		
Other				3	9	
Viscosity characteristics						
Strain point °C	956	510	484	436	473	395
Annealing point °C	1084	560	523	480	514	435
Softening point °C	1580	821	755	712	696	630
Working point °C	—	1252	1146	1128	1005	985
Expansion coefficient ×10 ⁻⁷ /°C	3.5	35	43	53	105	97
Shock temperature, 1/4-in. plate °C	1000	130	130	100	50	50
Specific gravity	2.20	2.23	2.35	2.27	2.47	3.05

Tabla 2.3.1 Propiedades de ciertos vidrios usados en aplicaciones de vacío

Un material cerámico es un material policristalino, inorgánico y no metálico formado por un tratamiento de calor con o sin presión. Son mecánicamente duros, tienen propiedades aislantes térmicas y eléctricas muy buenas, y tiene una baja presión de vapor. Algunas propiedades de ciertos materiales cerámicos se observan en la tabla 2.3.2.

Ceramic	Main Body Composition	Expansion Coefficient (×10 ⁻⁷)	Softening Temperature (°C)	Tensile Strength (10 ⁶ kg/m ²)	Specific Gravity
Steatite	MgOSiO ₂	70–90	1400	6	2.6
Forsterite	2MgOSiO ₂	90–120	1400	7	2.9
Zircon porcelain	ZnO ₂ SiO ₂	30–50	1500	8	3.7
85% alumina	Al ₂ O ₃	50–70	1400	14	3.4
95% alumina	Al ₂ O ₃	50–70	1650	18	3.6
98% alumina	Al ₂ O ₃	50–70	1700	20	3.8
Pyroceram 9696 ^a	Corderite ceramic	57	1250	14 ^b	2.6
Macor 9658 ^a	Fluro-phlogophite	94	800	10 ^b	2.52

Tabla 2.3.2 Propiedades físicas de ciertos cerámicos

Algunos de los materiales que se comportan mejor se comportan en vacío son: acero inoxidable, aleaciones de níquel, níquel magnético, titanio, niobio, cerámicos de alúmina, cerámicos maquinables, acero degasificado en vacío, molibdeno, tungsteno, tántalo, plata, oro, platino, la soldadura eutéctica de plata y cobre, y el vidrio.

Se deben usar cerámicas como aislantes y eliminar el teflón y el kapton siempre que sea posible.

Para el uso apropiado de la mayoría de los materiales, normalmente se realizan tratamientos de cocción, para que dé lugar la degasificación, a altas temperaturas (de 250

a 400 °C). El sello del sistema de vacío se debe realizar mediante juntas de metal (típicamente cobre), que se suelen utilizar en sistemas que no se suele realizar la apertura de la cámara.

Cuando se requiere abrir y cerrar la cámara de manera frecuente, se usan juntas de un polímero resistente a temperaturas relativamente altas, las más comunes están hechas de poliamida o de un polímero de fluoro-carbono. Aunque la velocidad de degasificación de esta poliamida es aproximadamente 1000 veces más grande que la del acero inoxidable, dentro de los polímeros flexibles, es de los que mejor se comporta.

2.3.2. Plásticos en vacío

El uso de los plásticos en vacío no está bien visto ya que aumentan la presión última que puede alcanzar la cámara. De todas formas, se han estudiado polímeros especiales que tienen una baja degasificación y unas buenas propiedades de aislante térmico y eléctrico.

Se han realizado varias patentes muy interesantes de poliamidas que tienen una alta presión de vapor y muy baja degasificación, del orden del acero inoxidable AISI 304L o 316L. Estos polímeros en polvo se pueden utilizar para realizar impresiones 3D de piezas complicadas y así, poder facilitar el trabajo a la hora de diseñar un dispositivo de vacío.

2.4. Técnicas de limpieza

2.4.1. Limpieza del Tántalo y del Titanio

Las técnicas de limpieza del titanio y del tántalo que se indican a continuación, se han extraído del libro (Rosevury, 1993).

Para realizar la limpieza del tántalo, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Bañarlo en una solución caliente de ácido clorhídrico del 20%
2. Aclararlo completamente en agua destilada o desionizada
3. Bañarlo en un líquido limpio de cloro sulfúrico a 120 °C
4. Aclarar en caliente, en agua caliente del grifo, y luego aclarar completamente en agua caliente destilada o desionizada

Las partes se deben secar de una forma limpia, mediante aire caliente, evitando toda contaminación y polvo. El metal no se debe limpiar con papel o ropa, o manipular con los dedos. Se debe guardar en recipientes herméticos al polvo.

Para la limpieza del titanio, en cambio, el metal se introduce en una solución de ácido nítrico al 20-30%, con un 2% de ácido sulfúrico a 54 °C. Si el titanio no ha sido calentado por encima de los 600 °C, este tratamiento debe ser suficiente para eliminar la contaminación.

2.4.2. Limpieza del sustrato

Se puede evitar el uso de reactivos químicos muy eficientes pero a su vez muy contaminantes para el medio ambiente, como el disolvente orgánico comúnmente usado tricloroetano (o metilcloroformo) C_2HCl_3 , el tricloroetileno, de igual fórmula química C_2HCl_3 , usado como disolvente de grasa o el tetracloroetileno C_2Cl_4 , usado como disolvente en limpieza de sustratos metálicos) mediante el siguiente procedimiento:

1. Lavado en agua desionizada con detergente biodegradable alcalino, tipo Alconox¹, preferiblemente inmerso en ultrasonidos, que elimina residuos de naturaleza grasa (lípidos) y residuos ácidos.
2. Aclarado en agua desionizada (*rinse*)
3. Lavado en acetona, que elimina restos de naturaleza orgánica, preferiblemente en ultrasonidos. No requiere aclarado ya que se evapora rápidamente (presión de vapor 24 kPa a 20 °C)
4. Lavado en (preferiblemente vapor de) alcohol isopropílico, que elimina otros residuos que la acetona no es capaz de disolver

Este es el procedimiento típico para limpieza de sustratos de vidrio u otros cristalinos usados para crecimiento epitaxial de películas, como el zafiro. Para sustratos de silicio, es necesario, después del procedimiento de limpieza indicado, un ataque químico mediante ácido fluorhídrico para eliminar la capa de óxido que se forma de manera prácticamente inmediata en presencia del aire.

2.5. Técnicas de sellado

Normalmente, un sistema o una cámara de vacío no pueden ser construidos como una sola unidad. Se deben usar varios componentes o formas y diferentes materiales, y tener la posibilidad de cambiar ciertas partes para poder abrir y cerrar la cámara. Estas partes están unidas entre sí por medio de varios sellados, que permiten unir las diferentes partes para minimizar la fuga a través de la junta.

El requerimiento común y problema habitual de los sellados en vacío es su estanqueidad. Todos los sellados en vacío tienen alguna fuga por mínima que sea, pero no tiene por qué ser necesariamente un sistema hermético. Un sellado hermético está diseñado para permitir a través de él una pequeña fuga no detectable, es decir, cuando la ligera fuga del sellado sea lo suficientemente pequeña según las especificaciones necesarias.

En este trabajo, los sellados se clasifican en sellados permanentes (soldaduras, o por contacto de materiales), desmontables (resinas de vacío, lubricantes), de transmisión de cargas eléctricas, de transmisión de movimiento, y de transferencia de materiales (válvulas, bloques de vacío).

2.6. Detección de fugas

¹ ALCONOX, Inc. Jabón especial para la limpieza de materiales o para su uso como detergente.

2.6.1. Localización de fugas

Existen dos tipos diferentes de técnicas para la localización de fugas en un sistema: la prueba del trazador o la prueba del detector. En la prueba del trazador, una corriente de un cierto gas se propaga en el área deseada, y éste gas penetra en el sistema camino al detector. En la prueba del detector, el sistema se llena de un cierto gas, y el detector que se utiliza, detecta el gas en la zona de la fuga, recibiendo el gas e indicando el lugar por el que sale el gas.

En nuestro caso utilizamos la prueba del trazador, con el uso de dos líquidos (acetona e isopropanol) que esparcimos sobre la zona deseada. En cuanto el líquido encuentra una fuga, penetra por el hueco hacia el interior de la cámara (debido al vacío interior) y, debido a su baja presión de vapor, se vaporiza contribuyendo al aumento de la presión en la cámara. Este aumento brusco de presión se aprecia en la medida del detector y así localizamos el punto a través del cual entra el aire en la cámara.

2.6.2. Medida de fugas

Una cámara de vacío ideal mantiene el vacío interior, es decir, la presión alcanzada, en el momento que se separa de la bomba. Cualquier cámara real tiene un aumento de presión en su interior, debido a que el gas del exterior se introduce a través de las juntas (si no están bien apretadas o si están defectuosas, cuestión subsanable) y mediante la permeación a través de ellas, como en las de vitón, por las que gases como hidrógeno o helio, de tamaño atómico muy pequeño, pueden permear.

También ocurre el aumento de la presión interior debido a que el gas a causa de la degasificación (*outgassing*) de las paredes internas de la cámara.

La medida del caudal revela el valor del caudal total de las fugas, de todo el sistema de vacío medido. Las formas de medida se dividen en dos tipos: estáticos y dinámicos.

En un análisis estático, el dispositivo que se va a analizar se rellena con un cierto gas, y se comprime para dejarlo en vacío. La concentración de dicho gas se monitoriza en función del tiempo. Desde que la concentración aumenta durante un periodo de tiempo, se denomina test de acumulación. La medida se realiza e interpreta mediante

$$Q = V \left(\frac{dP}{dt} \right)$$

Donde Q es el caudal de fuga, V el volumen del sistema, P la presión del gas, y t el tiempo de acumulación. En un análisis dinámico, en cambio, el sistema o el desarrollo se analiza evacuando el gas continuamente.

2.7. Reglas de operación en sistemas de vacío

Se deben respetar ciertas reglas para hacer un uso adecuado de un sistema de vacío, las cuales se definen a continuación:

- Al arrancar una bomba mecánica, asegurarse de que el rotor gira en la dirección adecuada, y que el nivel de aceite es correcto
- Dejar siempre ventilada la bomba mecánica a presión atmosférica cuando se apaga. La presencia de cierto vacío adicional en la bomba suele causar que el aceite entre en la carcasa o en el sistema.
- No permitir que la bomba mecánica trabaje en vacíos superiores a los permitidos, ya que se puede causar la evaporación del aceite y su introducción en el sistema.
- No ejecutar una bomba mecánica a excesivas altas presiones en periodos continuos. El motor no suele estar dimensionado para esas presiones y el bombeo puede expulsar aceite junto al gas.
- No ventilar la trampa de nitrógeno líquido al aire mientras esté fría. Remover todo el líquido de agua condensado de la superficie de la trampa antes de su uso, para evitar agua congelada en la trampa.
- Cuando una cámara de vacío es ventilada a presión atmosférica en un corto periodo de tiempo, es recomendable usar un gas inerte seco (como nitrógeno) para minimizar la adsorción en las superficies del sistema de vacío.
- Los medidores por ionización (*ionization gauges*) se deben usar en presiones menores que 10^{-3} torr.

3. Fenómenos físico-químicos en técnicas de vacío

3.1. Evaporación-Condensación

3.1.1. Vapor en sistemas de vacío

Además de los gases, los sistemas de vacío también contienen vapores. El nombre vapor se refiere a un gas real, cuando está por debajo de su temperatura crítica. La temperatura crítica es la temperatura límite por encima de la cual un gas miscible no puede ser licuado por compresión

Cuando en un sistema hay presente una sustancia en estado líquido, algunas de las moléculas cercanas a la superficie tienen energía cinética suficiente para escapar a la atmósfera y existir como gas. Elevar la temperatura facilita este proceso.

Si el líquido está abierto a la atmósfera, las moléculas de vapor se liberarán rápidamente del líquido, creando un vapor no saturado.

Si la sustancia está en un espacio cerrado, la presión del vapor alcanzará un máximo, que depende de la naturaleza de la sustancia y de su temperatura. El vapor está entonces saturado y su presión es la presión del vapor saturado. En este caso, se establece un equilibrio dinámico, entre el número de partículas que escapan del líquido y las que se condensan, y donde el número neto de partículas que permanecen en estado gaseoso es constante.

Los sistemas de vacío contienen vapor tanto saturado como no saturado, y estos vapores pueden mantener el estado físico o ir cambiándolo según la presión, el volumen y la temperatura existentes en el sistema.

3.1.2. Presión de vapor y velocidad de evaporación

La presión de vapor P_v de las sustancias es un valor que proviene de la ecuación de Clausius-Clapeyron.

$$L_T = (T/J)(V_G - V_L)(dP_v/dT)$$

Donde L_T es el calor latente de la evaporación, J es el equivalente mecánico de calor ($J_{15^\circ C} = 4,1855 \cdot 10^7$ erg/cal), V_G y V_L son los volúmenes específicos del gas y del líquido respectivamente.

En los casos que ocurren en técnicas de vacío, el valor de V_L es muy pequeño comparado con el valor de V_G . Por tanto, partiendo de la ecuación de los gases ideales, el valor de V_G se puede definir como

$$V_G = R_0 T / P_v$$

Sustituyendo esta ecuación en la ecuación de Clausius-Clapeyron, resulta

$$L = \left(\frac{R_0}{J}\right) \left(\frac{T^2}{P_v}\right) \left(\frac{dP_v}{dT}\right)$$

Sustituyendo en esta ecuación el valor del calor latente de evaporación $L_T = L_0 + IT$, donde I es una constante y L_0 es el calor latente de evaporación cuando $I=0$, resulta

$$\int \frac{dP_v}{P_v} = \ln P_v$$

Utilizando la ecuación de la cantidad de masa que se escapa al exterior en velocidades moleculares obtenemos la velocidad de evaporación ($\text{g/s}\cdot\text{cm}^2$), que es igual a la velocidad de condensación

$$W = 5,83 * 10^{-2} P_v \sqrt{\frac{M}{T}} * f$$

Donde f es el coeficiente de llegada definido por la probabilidad que tienen las moléculas incidentes de llegar a la superficie.

3.2. Desorción

3.2.1. Fenómeno

Cuando un material se encuentra en vacío, el gas que ha sido previamente introducido en la cámara o adsorbido por las paredes de los materiales internos empieza a desorber.

La desorción es la separación de las moléculas de un cierto material, y es influenciada por la presión, la temperatura, y el tipo y forma de la superficie del material. El gas o vapor adsorbido está en la superficie interna de la cámara, alojado en los intersticios micrométricos (por muy pulido que esté) por medio de pequeñas fuerzas de interacción con el material del que está hecha la cámara. El calentamiento de la cámara (*bakeout*) da energía para favorecer la desorción, que tiene lugar cuando se rompe este enlace. Pero puede haber más de una monocapa de por ejemplo vapor de agua adsorbido.

La temperatura es un factor importante en el fenómeno de desorción. La desorción es endotérmica, así que se acelera con el aumento de la temperatura. El bombardeo de electrones o protones aumenta considerablemente la desorción. Por ejemplo, cuando la superficie que se bombardea es de Ti o Al, la presión aumenta de 50 a 100 veces (Roth, 1990).

La forma del material influencia la desorción, tanto si el gas es adsorbido como si es absorbido. Si ha sido adsorbido, el único factor de influencia es la cantidad de superficie, pero si el gas se difunde al interior del material, el espesor también influenciará en la velocidad de desorción.

Ya que el fenómeno de desorción está conectado a la superficie física (A_p), la desorción siempre está conectada a la historia de los tratamientos de las superficies (como su acabado, limpieza, etc.).

3.2.2. Degasificación (Outgassing)

Se conoce como degasificación o *outgassing* a la generación de gas que ocurre en la desorción, y se expresa en términos de una *outgassing constant* (K). Esta constante (la velocidad específica de degasificación) se define como la velocidad a la que el gas aparece para emanar material, desde una superficie geométrica, y es usualmente medida en unidades de torr*Litro/sec*cm².

Los fabricantes de bombas aportan una velocidad de bombeo frente a las curvas de presión para cada bomba. Multiplicando la velocidad de bombeo a cierta presión por esa presión, nos resulta una medida denominada *throughput*.

$$throughput = v(p_0) * p_0$$

Es esencial medir la cantidad de gas que la bomba remueve del interior por unidad de tiempo, donde la palabra cantidad puede ser sustituida por masa o número de partículas. El *throughput* es la velocidad de flujo de masa y se suele medir en unidades de volumen por presión entre unidad de tiempo (torr*L/s).

4. Producción de bajas presiones

4.1. Parámetros y principios de bombeo

Aunque la tecnología de vacío se ha extendido en muchos rangos de presión, todavía no existe una sola bomba capaz de bajar desde presión atmosférica a un ultra alto vacío.

Ya que todas las bombas se ocupan en disminuir el número de partículas en fase gaseosa, se utilizan diferentes principios para bajar la presión. Las bombas están basadas en uno o más principios de los siguientes para su bombeo:

- Compresión-expansión del gas (bombas mecánicas)
- Arrastre por efectos de viscosidad (bombas de expulsión de vapor)
- Arrastre por efectos de difusión (difusoras)
- Arrastre molecular (bomba turbomolecular)
- Efectos de la ionización (bomba de ionización)
- Sorción física o química (bombas de sorción, criobombas y procesos de adsorción)

La selección del principio de bombeo de la bomba está definido por sus parámetros específicos. Estos suelen ser la presión última, el rango de presiones, la velocidad de bombeo y la presión de escape. En la figura 4.1.1 podemos ver el rango de presión general que usa cada tipo de bomba.

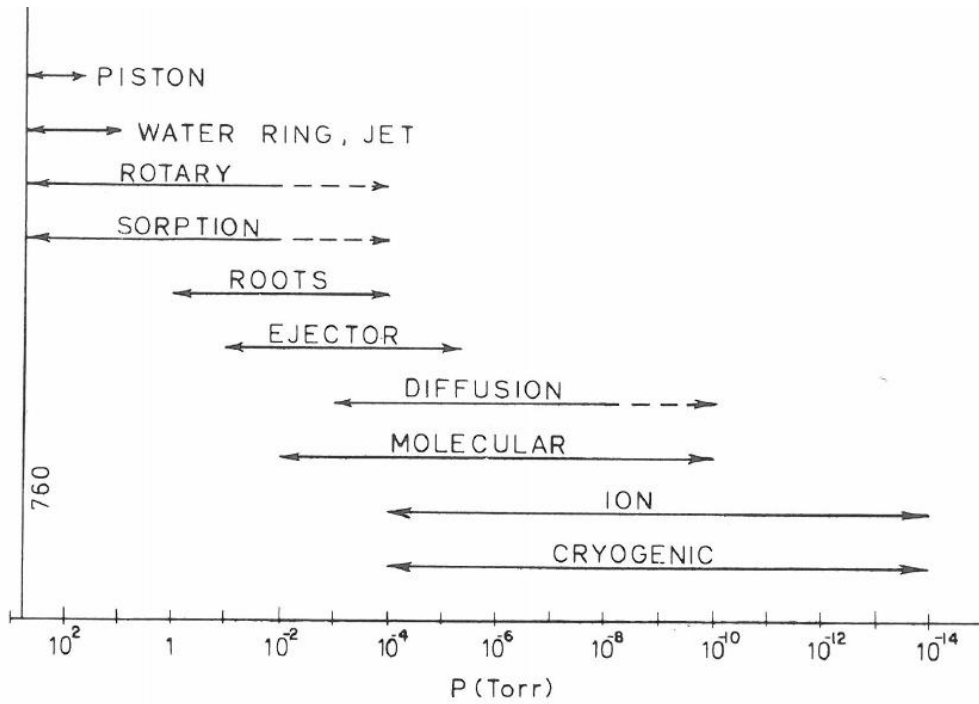


Figura 1.1.1 Rango de presiones genérico para cada tipo de bomba (Roth, 1990)

La presión última en la entrada de las bombas se puede determinar con las fugas de la propia bomba, o por la presión de vapor del fluido utilizado en la bomba. El rango de presiones de una bomba concreta es el rango en el cual la velocidad de bombeo de la bomba se pueda considerar constante, como se puede observar en la figura 4.1.2.

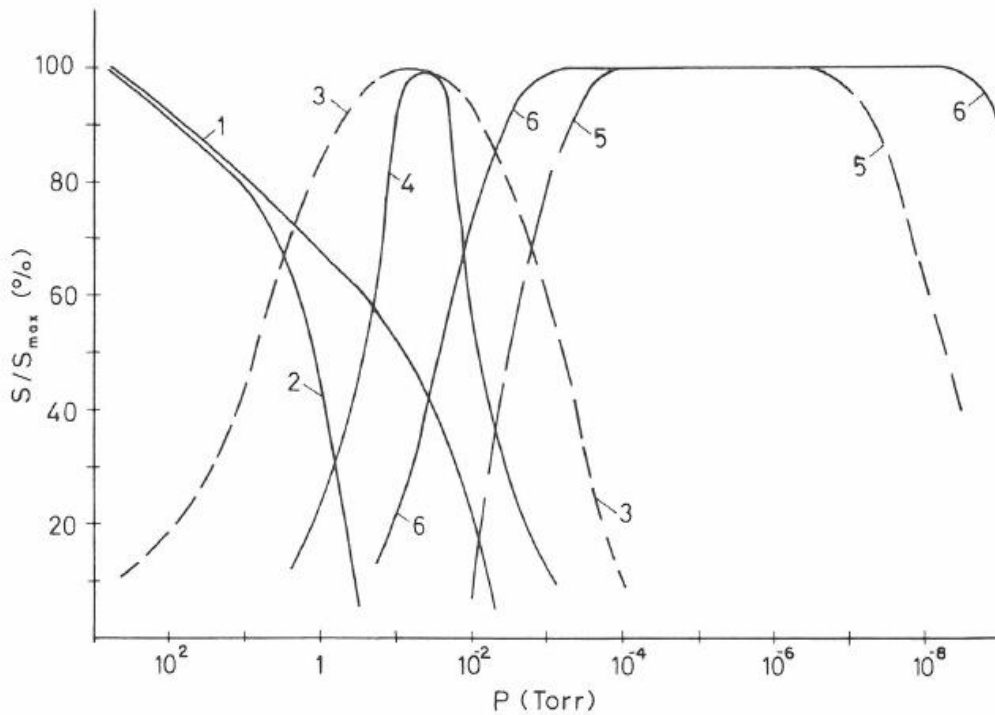


Figura 4.1.2 Velocidad de bombeo S de ciertas bombas, en términos de sus máximas velocidades de bombeo. 1. Rotary vane pump; 2. Rotary vane pump with gas ballast; 3. Root's pump; 4. Ejector pump; 5. Diffusion pump; 6. Molecular pump (O'Hanlon, 2003)

La presión de escape, en cambio, es la presión a la que la bomba debe operar. Es decir, la presión que debe lograrse a la salida de la bomba ya que se necesita una presión mayor a la ambiental. A no ser que exista otra bomba intermedia, por la cual pase el flujo de gas expulsado, antes de expulsarlo a la atmósfera.

4.2. Bombas de vacío

Las bombas de vacío pueden ser de dos tipos según su interacción con el gas.

- a) Las bombas de transferencia (bombas mecánicas o bomba turbomolecular), que fuerzan a las moléculas de gas que vayan en una dirección indicada debido al desplazamiento positivo o debido a un intercambio de momento. De esta forma, el gas es comprimido hasta que su presión es ligeramente mayor que la presión ambiental, y es expulsado a la atmósfera.

Las bombas de captura (como la bomba de ionización o bomba criogénica), en cambio, inmovilizan las moléculas de gas en superficies especiales dentro de un sistema de vacío. Para generalizar sus aplicaciones, las bombas de transferencia se usan para altas cargas de gas, o en el caso de las bombas turbomoleculares o las difusoras, para conseguir presiones del orden de 10^{-7} - 10^{-9} mbar. Mientras que las bombas de captura presentan presiones de ultra alto vacío, pudiéndose llegar a valores de presión de hasta 10^{-10} mbar con el uso de, por ejemplo, bombas criogénicas.

Estas bombas pueden llevar o no lubricante, diferenciándose entre las bombas secas o húmedas. Una bomba húmeda usa un aceite con una baja presión de vapor como lubricante en el mecanismo de bombeo, lo cual hace que el aceite líquido y vapor coexistan en el volumen interior de la bomba. La bomba seca sin embargo no tiene un fluido para el sellado del gas. Algunas bombas secas no pueden tener ningún lubricante mientras que otras tienen rodamientos lubricados sellados, separándose de la cámara de vacío por juntas tóricas (*O-rings*). Bombear gases agresivos puede afectar severamente a la vida útil de la bomba, dependiendo de la construcción de los componentes internos. Los fabricantes de bombas ofrecen versiones químicas de sus bombas con la función de protegerlas de la corrosión de los gases dañinos.

Se ha de tener en cuenta una función que suelen tener muchas de estas bombas, el *gas ballast*. Se trata de añadir un gas, aire o un gas inerte, en la bomba después de la compresión. Esto se hace para aumentar la presión y así poder evitar la condensación de los gases, y finalmente poder expulsar el gas al exterior por un flujo de aire mayor.

4.2.1. Bombas mecánicas

- *Rotary vane pump*

Las *Rotary Vane pumps* son las bombas comerciales más habituales, y se suelen utilizar para bombear gas en un rango de presiones de 1 a 10^5 Pa (presión ambiente).

En estas bombas, el gas entra en la cámara por el puerto de entrada y es atrapado entre las paletas del rotor y el cuerpo de la bomba. El rotor, que está montado excéntricamente, comprime el gas y lo barre hacia el puerto de descarga. Cuando la presión del gas excede

la atmosférica, la válvula de escape se abre y el gas es expulsado. El aceite usado en las paletas sirve como lubricante, refrigerante, y sellador del gas.

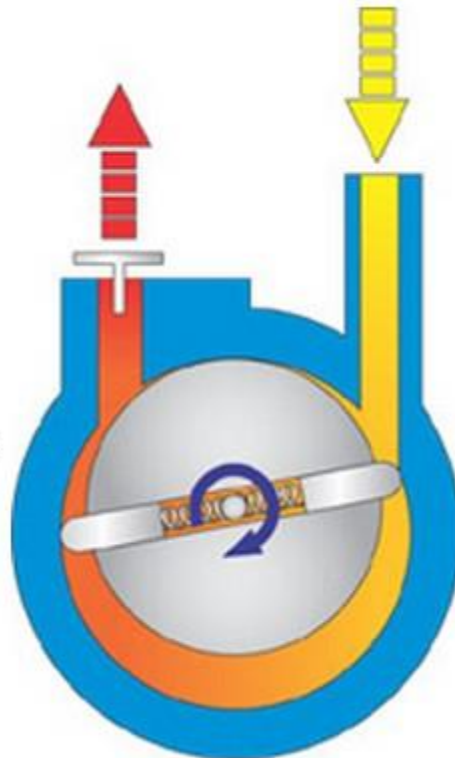


Figura 4.2.1.1 Esquema de bomba rotatoria (Kurt J. Lesker, 2009)

Este tipo de bombas se dividen en las de conducción directa y en bombas que usan una polea que reduce la velocidad del fluido. Las de conducción directa giran en un rango de 1500-1725 rpm, y adquieren una temperatura de 80 °C.

Las segundas, en cambio, giran a unas 400-600 rpm y alcanzan una temperatura de 60 °C, dependiendo de la viscosidad y cantidad de fluido. Existe una bomba de este tipo que dispone de dos fases (dos bombas en serie), en la cual la presión última adquirida llegaría a $2 \cdot 10^{-2}$ Pa. Bombea de 10 a 200 m³/h y se usa en sistemas que requieren un fuerte bombeo, o también con el fin de evitar el retroceso del gas en las bombas turbomoleculares.

- *Scroll pump*

Es un compresor de funcionamiento relativamente simple que consiste en dos superficies en espiral, una fija y otra orbitando.

Hay que tener en cuenta que el plato móvil no rota, solo orbita. Esto se consigue con un eje rotatorio excéntrico de la parte móvil, que realiza un movimiento orbital que genera un movimiento de vaivén de la espiral, acercándose y alejándose a las paredes del estator, comprimiendo el gas hacia el interior. Las ranuras en espiral de la imagen especular están cortadas en dos paredes, las placas del estator; a su vez, esta malla de placas contiene conjuntos de cantos complementarios. De esta forma el gas se va comprimiendo progresivamente hasta que se expulsa de la bomba por el centro.

Su presión última es de 1 Pa con un caudal de 15 a 40 m³/h y suelen ser fabricadas en tamaños pequeños.



Figura 4.2.1.2 Esquema de una Scroll pump

- En nuestro sistema de vacío que se utiliza este tipo de bomba, de la firma Varian², modelo SH-110 Dry Scroll Vacuum Pump.

4.2.2. Bomba turbomolecular

La bomba turbomolecular es una turbina que comprime el gas por transferencia de momento, desde la alta velocidad de las paletas a las moléculas de gas. La bomba opera en un rango de velocidad entre 24.000 y 80.000 rpm y es impulsado por fuentes de alimentación en estado sólido o por conjuntos de motores y generadores. La velocidad relativa entre las paletas ranuradas rotativas y las paletas ranuradas del estator hace posible que las moléculas de gas sean transportadas desde la entrada a la salida de la bomba.

Cada paleta es capaz de soportar la diferencia de presión. Como esta variación de presión es pequeña en cada etapa, se realiza una sucesión de ellas. Dando lugar a una disminución de presión que es producto de la variación de presión en cada una de estas etapas.

Las paletas imparten mejor el momento a las partículas de gas en un régimen molecular, así que la presión de salida de la bomba debe ser menor que la presión atmosférica. Por esta razón, se suele utilizar una bomba mecánica en serie con la turbomolecular para evitar el retroceso de las moléculas de gas a la bomba.

- En nuestro sistema disponemos de una bomba turbomolecular, concretamente la TURBO-V301. Unida a nuestra *Scroll pump*, se consiguen velocidades de bombeo de 5 m³/h a presión atmosférica o 280 l/s a 10⁻⁶ mbar, y presiones últimas menores que 3,3*10⁻⁷ mbar, que hemos alcanzado, aunque nominalmente la bomba permite alcanzar presiones de 2*10⁻⁹ mbar.

² Varian. Marca de una empresa de dispositivos de vacío.

4.2.3. Bomba de ionización

La bomba de ionización opera ionizando el gas interior mediante la descarga de electrones del cátodo. Las características necesarias para conseguir el bombeo de gases en vacío son:

1. Atrapamiento de los electrones en orbitas a causa del campo magnético
2. Ionización del gas por colisión de electrones
3. Bombardeo (*sputtering*) al titanio o tántalo por lanzamiento de iones
4. Atrapamiento (*gettering*) de gases activos por el titanio o tántalo
5. Bombeo de gases molestos a causa del enterramiento de iones
6. Difusión de hidrógeno y helio en el interior del titanio o tántalo
7. Disociación de moléculas complejas en moléculas más simples para su bombeo natural

La figura 4.2.3.1 es un esquema de una bomba de ionización de diodo. Los elementos principales son los imanes magnéticos (1), la cubierta de la bomba (2), y un elemento que consiste en dos cátodos (3) y múltiples celdas anódicas (4). La aplicación de un alto voltaje positivo al ánodo crea una descarga de plasma. Los iones se forman (figura 4.2.3.2) a partir de las moléculas de gas presentes en el sistema. Estos iones son acelerados hacia uno de los cátodos. Cuando colisionan, pueden ser enterradas o rebotadas para ser enterradas en cualquier sitio.

Además, el titanio se bombardea desde el cátodo para ser depositado en cualquier lugar de la bomba donde actúa como un atrapador de gases activos. Una bomba de ionización, por lo tanto, no elimina el gas del interior del sistema de vacío, atrapa el gas en diferentes superficies.

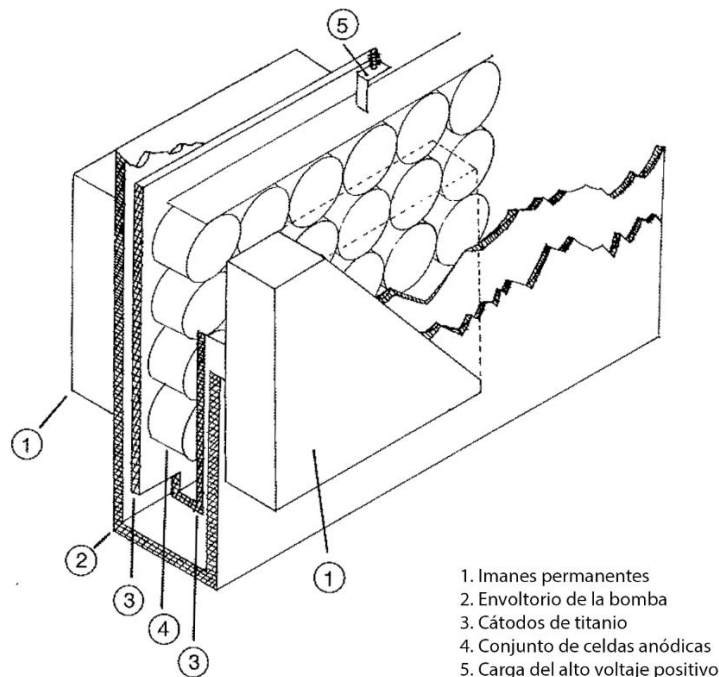


Figura 4.2.3.1 Corte de una típica bomba de ionización de diodo (Thermionics Laboratory, Inc., 2001)

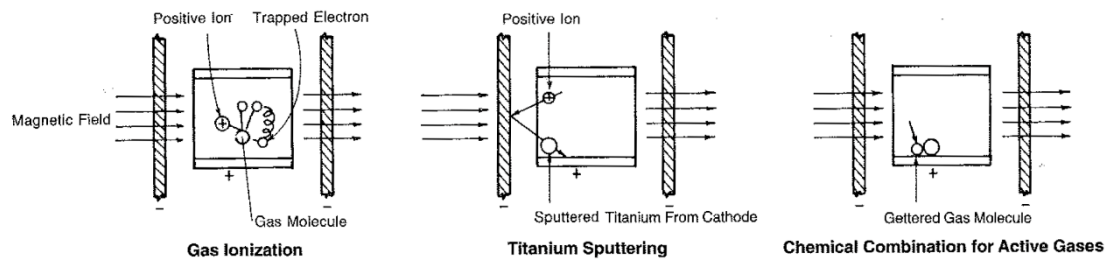


Figura 4.2.3.2 Estructura del mecanismo de la bomba de ionización de diodo
(Thermionics Laboratory, Inc., 2001)

4.2.4. Bombas criogénicas

El proceso de bombeo que utilizan estas bombas es que los gases (vapores) son condensados a bajas temperaturas para reducir la presión. Estas bombas pueden utilizar tres mecanismos: condensación criogénica, sorción criogénica y la captura criogénica.

La condensación criogénica ocurre cuando las moléculas del gas impactan sobre la superficie fría y se termalizan (reducen su energía cinética) llegando a condensarse y formando capas que pudieran llegar a tener espesores milimétricos.

La sorción criogénica es la adsorción física de gases en superficies frías, aumentando la capacidad con superficies más grandes.

La captura criogénica, en cambio, es el proceso con el que los gases se entierran en una capa creciente de condensación sólida de otro gas.

- **Trampa de Nitrógeno líquido
(Trampa fría)**

Los gases se pueden atrapar en superficies frías donde se condensa el vapor, resultando una presión parcial que puede ser significativamente menor que la presión parcial de equilibrio a la temperatura de la superficie fría. Este bombeo es el principio que utiliza la trampa de nitrógeno líquido, y se conoce como trampa fría (*cryotrapping*).

El *cryotrapping* nos ofrece la posibilidad de bombear gases como N_2 , H_2 , o Ar mucho más eficientemente en presencia de un agente contaminante (como el vapor de agua) que en un sistema donde todos estos agentes han sido cuidadosamente eliminados. El atrapamiento del bombeo criogénico se cree que es debido a que el gas no condensable es arrastrado por un vapor condensable que lo ha atrapado en su superficie porosa.

El *cryotrapping* del nitrógeno y argón por vapor de agua condensa a 77 K, se sabe que el vapor de agua forma un depósito poroso con un área efectiva de $600 \text{ m}^2/\text{g}$ de agua. La cantidad de N_2 y Ar requerido para saturar la superficie depositada de agua es proporcional a la cantidad de agua depositada.

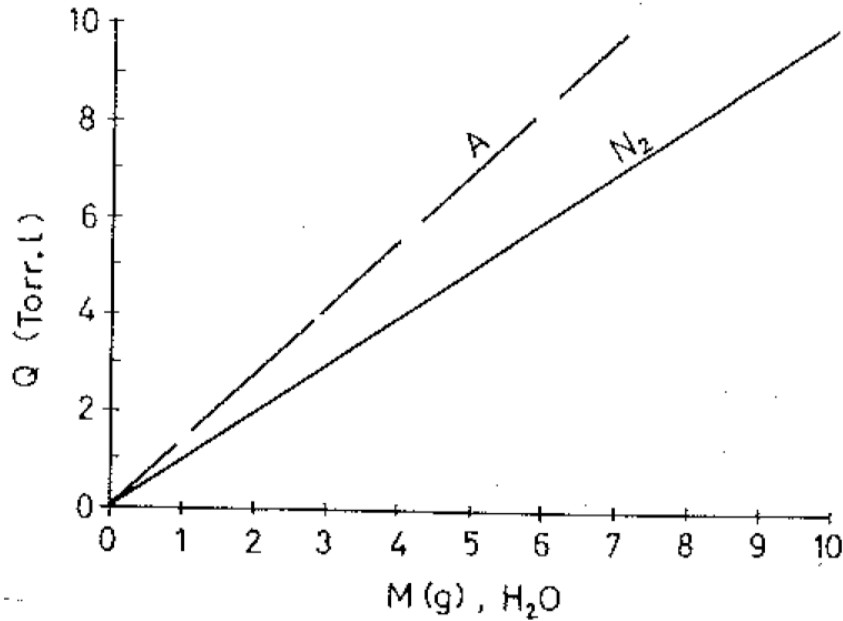


Figura 4.2.4 Cantidad Q de nitrógeno y argón para saturar el recubrimiento de agua M (gramos) (Roth, 1990)

El número de moléculas de nitrógeno atrapadas por molécula de agua condensada en la superficie tiene un valor constante de unos 10^{-2} torr a presiones parciales del N_2 por encima de 0,1 torr. Luego la presión decrece por disminuir la presión parcial a un valor de $5 \cdot 10^{-5}$ a 10^{-5} torr.

5. Medición de bajas presiones

5.1. Clasificación de medidores

El rango de la tecnología de vacío se extiende hoy en día en 19 órdenes de magnitud de presión por debajo de la atmosférica. Por tanto, las técnicas de medida del vacío han tenido un desarrollo para poder medir a bajas presiones variando significativamente las magnitudes, hasta la presión de 10^{-16} torr. No existe un solo medidor capaz de medir en todo el rango de presiones, así que se han desarrollado diferentes medidores para cada rango de presión.

Las técnicas de medición se volvieron más complicadas debido a que solo se podía observar un movimiento físico debido a fuerzas de presión, en un rango de 760 a 1 torr. En una medición en rango de presiones menor es necesario utilizar otras propiedades físicas para medir la presión.

Según el rango de presiones que pueda medir un medidor, se realiza la clasificación de la siguiente figura.

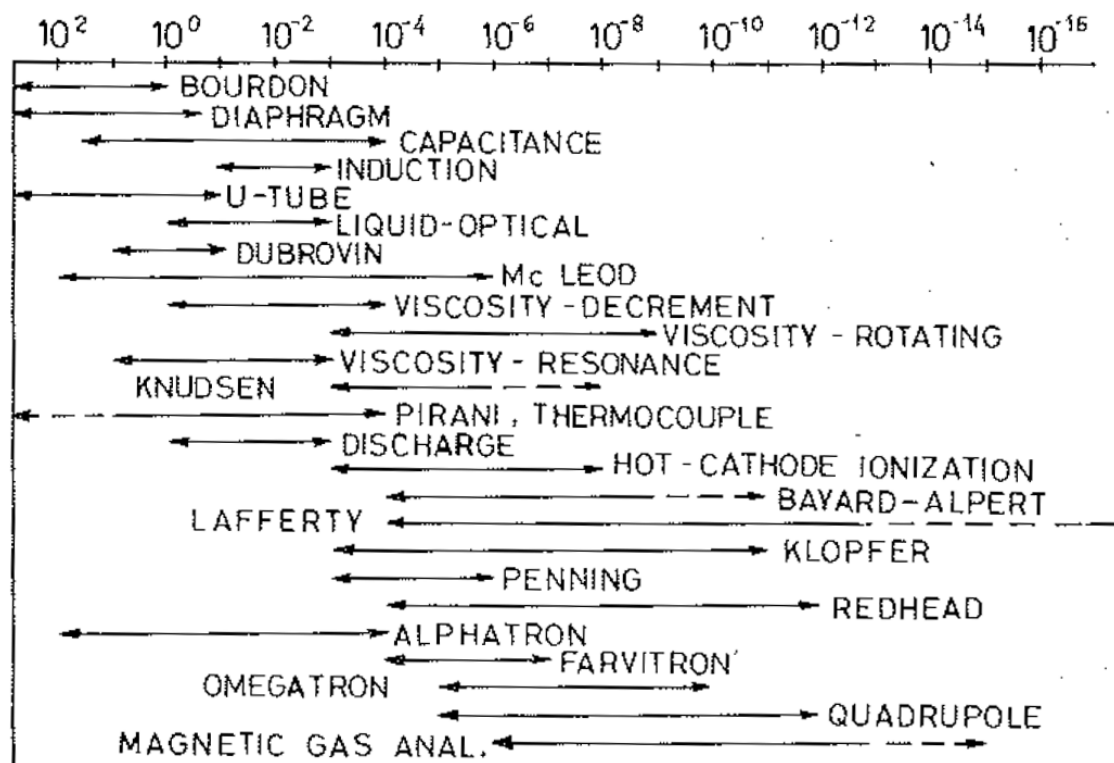


Figura 5.1 Rangos de presión y medidores de vacío (Roth, 1990)

5.2. Medidores mecánicos

5.2.1. Medidor de Bourdon

El medidor de Bourdon consiste en un alambre helicoidal de tubo hueco de sección elíptica sellada en un extremo y conectada con el otro extremo a un sistema de vacío para ser medida la presión. La aguja está unida por una conexión mecánica al extremo libre, y se mueve en una escala calibrada.

Si la presión dentro del tubo disminuye por debajo de la presión atmosférica, la sección del tubo tiende a ser más redondeada, que causa que el radio de la espiral disminuya. Y finalmente, mueva la aguja.

La medida de la aguja depende de la presión atmosférica, dado que se realiza una medida de diferencia de presión.

5.2.2. Medidor de diafragma

Los medidores de diafragma miden diferencias de presión por la deflexión del diafragma del metal o de fueles. La medición se amplifica mecánicamente, ópticamente o eléctricamente (capacitancia, medidor de tensión, inductancia).

La medida de presión en la tecnología de vacío, la presión de referencia de interés no es la presión atmosférica, pero se toma como cero, según la sensibilidad del medidor.

5.3. Medidores de conductividad térmica

Los medidores de conductividad térmica están basados en un filamento montado dentro de un cristal o metal, conectado a un sistema de vacío, el filamento es calentado debido al paso de una corriente eléctrica. La temperatura del filamento depende de la velocidad con la que se aplica corriente eléctrica, el calor se pierde por conductividad a través del gas que hay alrededor, el calor se pierde debido a la radiación (y convección), y se pierde a través de las cargas introducidas al filamento.

Si la velocidad con la que se aplica la energía eléctrica se mantiene constante, y se minimizan las pérdidas por radiación, la temperatura del alambre depende principalmente de la pérdida de calor a través de la conductividad térmica con el gas, que es una función directa de la presión.

5.4. Medidores por ionización

Los medidores por ionización, también llamados medidores de filamento caliente, son los dispositivos de medición más utilizados en sistemas de baja presión, ya que son capaces de medir un rango de presiones de 10^{-3} torr a 10^{-10} torr. Se trata de un triodo, donde el filamento caliente se usa como cátodo.

Para su funcionamiento, se hace pasar una corriente de unos 10 mA por el filamento para que se caliente y se ponga iridiscente. Cuando el filamento emite luz, emite una corriente controlada de electrones que son atraídos a la reja helicoidal por la variación de potencial (+150 voltios). La mayoría de los electrones pasan a través de la celda, y colisionan con las moléculas de gas encerradas en el volumen interior, causando la ionización del gas. Los iones del gas formados por las colisiones de electrones son atraídos al alambre colector central de iones por su corriente negativa. De esta forma, la corriente es amplificada y medida por un electrómetro, y según la intensidad de la corriente la presión corresponde a un valor predeterminado.

A una misma presión, esta corriente de iones puede variar según el gas. Este error es directamente proporcional a la densidad molecular de los gases, y por tanto, se utilizan unos factores de corrección según el gas que se vaya a medir.

6. Dispositivos de vacío

6.1. Válvulas

Las válvulas están diseñadas con el objetivo de aislar un objeto de vacío del efecto de las bombas, controlar el flujo de gas para conseguir una presión particular o permitir la transferencia de objetos entre en vacío. Los materiales más comunes que se suelen utilizar para la fabricación de estos dispositivos suelen ser acero inoxidable, aluminio y vidrio.

Todas las válvulas disponen de una parte móvil que puede abrirse y cerrarse, y su forma de y el tipo de movimiento que realiza varían considerablemente en cada diseño.

6.2. Pasamuros (*feedthroughs*)

Un pasamuros se refiere al dispositivo que es capaz de transferir todo tipo de servicios, utilidades y señales a través de una pared del sistema de vacío. Se suelen dividir comúnmente en eléctricos, de gas o líquido, criogénicos, y ópticos.

Estos dispositivos son necesarios cuando se requiere manejar mecanismos o sistemas que se encuentran en el interior de la cámara. De esta forma, evitamos que se produzcan fugas en los diferentes puertos donde se suelen colocar estos dispositivos.

7. Evaporación de materiales

7.1. Métodos de calentamiento

El objetivo de un calentador es el aumentar suficientemente la temperatura de los materiales emisores de electrones como un cátodo para producir una óptima emisión termoiónica.

7.1.1. Resistivo

- **Filamentos**

Los alambres de tungsteno de uno o varios filamentos son doblados siguiendo una forma (un lazo, un círculo o una bobina) que ajusta un montaje particular o un requerido patrón de evaporación.

El material a evaporar es depositado en el alambre por la inmersión en la fusión, dentro de una solución de una sal térmicamente degradable, o físicamente capturado por los diferentes trozos. La velocidad de la evaporación del gas varía con el cambio de la corriente. Si el material se humedece o se alea con el calentador, puede ocurrir un cambio de la velocidad de evaporación no reproducible o continua. Como el filamento es barato, se suele usar una vez y se desecha.

- **Calentadores de cesta**

Si al alambre de metal refractario se le da forma de una cesta cónica invertida, se pueden insertar trozos de material más largos en el cono. También se suelen usar para calentar pequeños crisoles.

- **Cuencos y cajas**

Estos dispositivos son láminas finas, y suelen estar hechos con materiales que soporten altas temperatura, como por ejemplo los cuencos de tungsteno, de tántalo, o de molibdeno. Para dar forma a estas láminas se utilizan pliegues, hoyos, dobleces, etc., con el fin de crear una base para el material a evaporar y evitar que se desplace en su calentamiento. Existen unas láminas con hoyos para cajas deflectoras multicámara, con chimeneas de vapor dirigidas hacia los lados. El *baffle* en la caja deflectoras previene una línea de visión entre el evaporante y el sustrato. Este tipo de fuente se usa donde se sabe que el evaporante se crepita.

- **Cuencos recubiertos**

La diferencia con los cuencos normales, es que los cuencos recubiertos tienen una fina capa coherente de óxido de aluminio cubriendo la lámina. Estos cuencos suelen ser recomendados para cuando el evaporante caliente reacciona con el metal refractario.

● Celdas de Knudsen

Se utilizan donde se requiere una repetible y constante velocidad de evaporación. La clásica celda de Knudsen es un contenedor de tungsteno para una masa alargada y de pequeño volumen con una tapa gruesa ajustada donde se encuentra una apertura de forma cónica invertida. El contenedor está montado en puntos de aguja de tungsteno para reducir pérdidas térmicas y por filamentos calentadores de tungsteno y difusores, para asegurar una temperatura uniforme. Fuera de los calentadores, se reducen los gradientes térmicos en la celda gracias a varios planos de blindaje protectores contra la radiación reflexiva.

Como la celda mantiene la uniformidad, sabemos la temperatura, y conocemos la P_v de equilibrio del evaporante. La apertura es pequeña, así que el vapor se pierde a través de ella, pero no afecta significativamente a la presión interna de la celda, y la velocidad de efusión del evaporante se mantiene constante. Además, la pequeña apertura hace que el vapor emerja en forma de coseno. La temperatura máxima habitual para la celda de Knudsen es de 2.000 K a 2.100 K.

● Crisoles

Los crisoles y los revestimientos se usan para mantener libre el corazón del haz de electrones del evaporante o para actuar como contenedor del evaporante para las fuentes térmicas de cesta o de lámina.

Para las fuentes de haz de electrones, el revestimiento suele ofrecer un beneficio no reconocido, es decir, una eficiente barrera térmica. La misma velocidad de deposición requiere solo 1/4 de la potencia necesaria de uno sin revestimiento. Esto reduce los costes de operación y disminuye la carga térmica del sistema. Sin embargo, un revestimiento debe ser conductor eléctrico para disipar la carga de iones. Para una fuente térmica, la resistencia térmica del crisol es una seria pero no inevitable desventaja. El calentador esta usualmente más caliente que la temperatura media del evaporante.

7.1.2. Fuentes de deposición por pulso láser (*PLD*)

Existen otras técnicas de evaporación de materiales, como la de deposición por láser pulsado (PLD) en la que un haz láser de pulsos muy energéticos arranca material de un material blando o fuente.

Tiene la ventaja sobre otros procedimientos de que se conserva la estequiometría del blanco en el material evaporado y usualmente el crecimiento de la película en el substrato es texturado (con una dirección de crecimiento cristalino preferente).

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

8. Objetivo del proyecto

El objetivo del presente proyecto es el diseño de un sistema para la coevaporación de materiales en una cámara de alto vacío y su condensación en forma de película sólida en sustratos apropiados (deposición en fase vapor, PVD).

Para ello se aprovisiona a la cámara de vacío un dispositivo interior que cumpla con la mayoría de las especificaciones que se deben conseguir.

9. Elementos base de nuestro sistema

El sistema de deposición de materiales se tiene que adaptar al volumen interior de la cámara de vacío, por lo que se han reproducido los componentes relevantes para el diseño en un programa de 3D (Solid Edge).

9.1. Collares

Nuestro sistema dispone de varios collares de acero inoxidable AISI 304L y AISI 316L, específicos para sistemas de vacío en los que se alcanzan grandes variaciones de presión. Los collares se pueden montar en ambos sentidos, y disponen de varios puertos de salida a los cuales se les pueden colocar bombas, medidores de presión, vidrios (para poder observar el interior de la cámara), tapas, u otras conexiones con el fin de amoldar el sistema a elección del usuario.

Los collares de los que disponemos, de diámetro similar, son los siguientes:

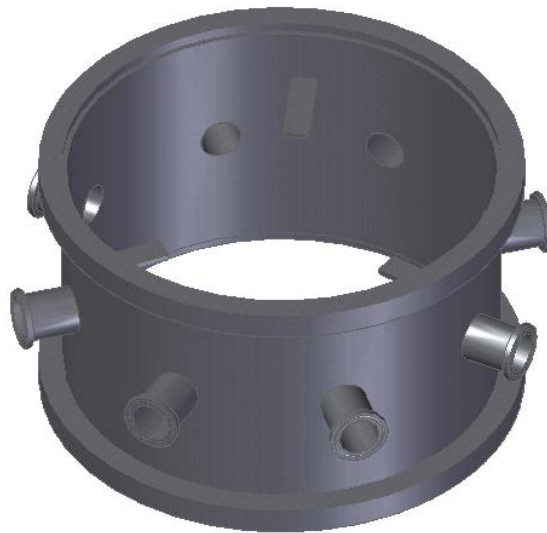


Figura 9.1.1 Collar de 8 puertos con pestañas interiores

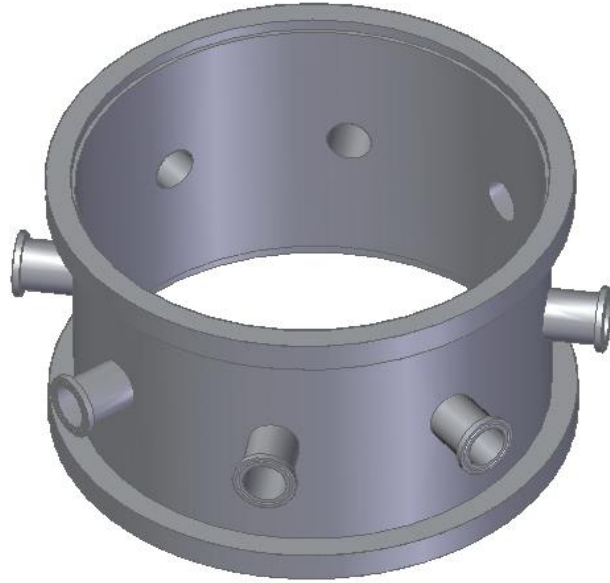


Figura 9.1.2 Collar de 8 puertos

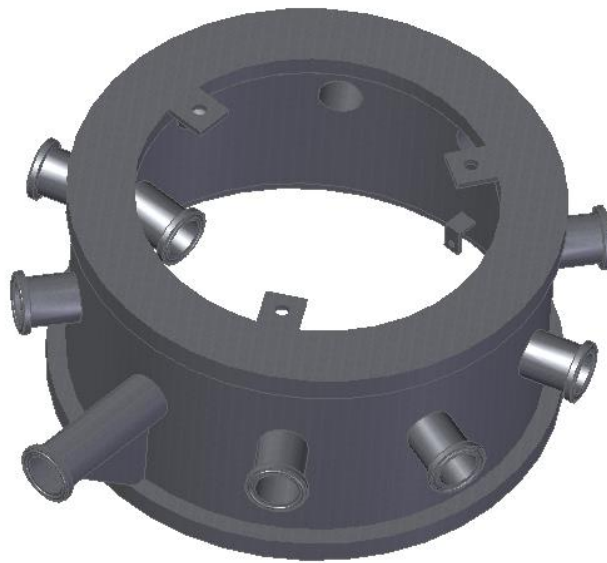


Figura 9.1.3 Collar de 10 puertos

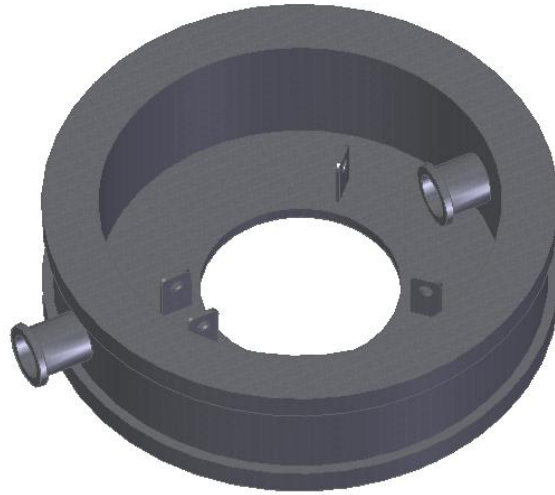


Figura 9.1.4 Collar de 2 puertos

9.2. Cubiertas

Con el fin de limitar nuestro sistema por la parte superior, disponemos de dos cubiertas ovaladas. Una de ellas (Figura 9.2.1) dispone de 6 puertos distribuidos por la superficie de la cubierta. La otra (Figura 9.2.2), en cambio, tiene una superficie lisa y sin puertos de salida.

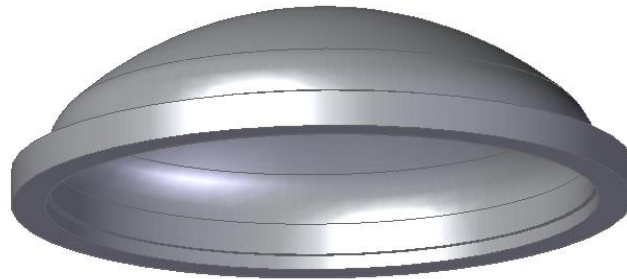


Figura 9.2.1 Cubierta lisa

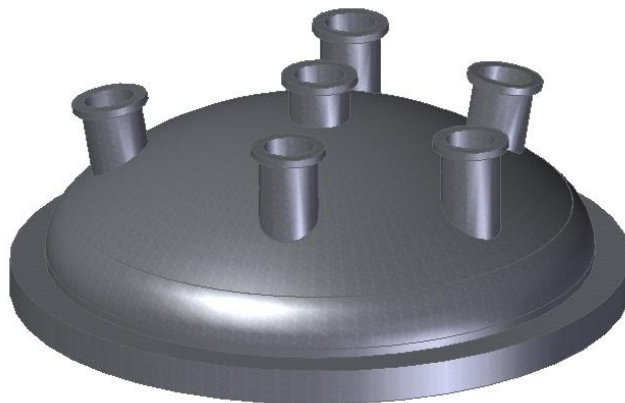


Figura 9.2.2 Cubierta de 6 puertos

9.3. Juntas y abrazaderas

Para poder realizar correctamente un vacío con el uso de diferentes módulos en un sistema de vacío, es necesario un material de unión. Para ello, se necesitan materiales que se adapten al sistema de cierre de cada puerto, como pueden ser el vitón o el cobre.

En esta cámara se utilizan dos modos de sellado; el sellado por presión y el sellado mediante elementos mecánicos.

- Sellado por presión

Para realizar este sellado se coloca una junta de un material elastómero, con el objetivo de que degasifique lo mínimo posible, normalmente vitón.

Una forma de usar este material es estirarlo hasta adaptarse al extremo del dispositivo, en nuestro caso al extremo del collar, para servir como material de unión entre dos collares de un diámetro similar. Al tener el sistema montado, la propia diferencia de presión entre la presión atmosférica y el vacío interior, hace que la junta de vitón se amolde a los extremos de los collares, realizando un sellado muy bueno.

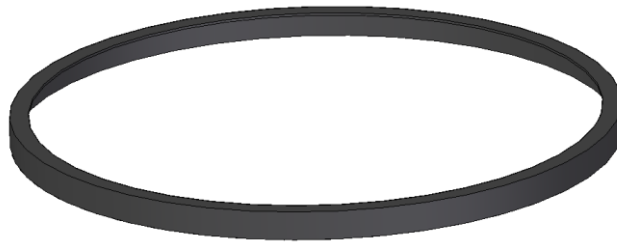


Figura 9.3.1 Junta de Vitón

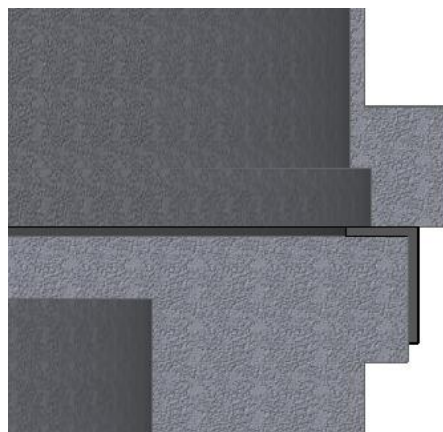


Figura 9.3.2 Disposición de la junta de vitón entre collares

La segunda forma de utilizar una junta de vitón, es usar un modelo tórico de ella. Esta junta se introduce en las cavidades de ciertos puertos, quedándose fijada en su interior. Para acabar de realizar este tipo de sellado se hace uso de una abrazadera situada en el exterior al puerto, que realiza una fuerza de presión entre los dos puertos mediante el giro manual de una llave de mariposa.



Figura 9.3.3 Junta tórica de vitón (O-ring)



Figura 9.3.3 Abraza de acero

Normalmente, suele tenerse en cuenta el tipo de material de esta junta y su degasificación, dado que la presión última del sistema total suele estar definida por los límites de esta junta.

- Sellado mediante elementos mecánicos

Este tipo de sellado consta de dos dispositivos; la junta de cobre y los elementos mecánicos. Para ello, se dispone la junta de cobre como material intermedio entre dos puertos, y mediante el uso de tornillos, se realiza presión uniformemente apretando los tornillos poco a poco y en estrella, es decir, alternando de lado cada vez que se realiza el apriete. De esta forma, las pestañas de los puertos penetran en el cobre, deformándose y adaptándose a las dos partes, proporcionando así un buen sellado.



Figura 9.3.2 Junta de cobre

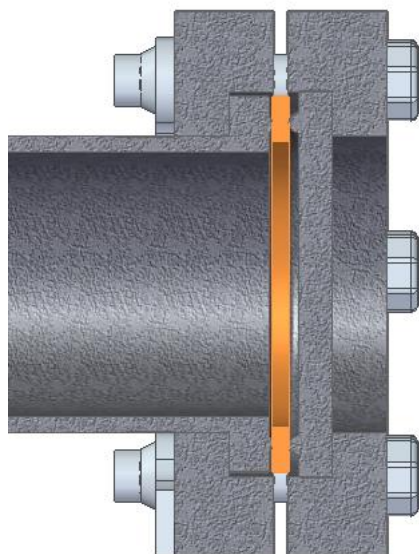


Figura 9.2.3 Junta de cobre dispuesta en el puerto de salida de un collar

9.4. Bombas

En nuestro sistema, hacemos uso de tres bombas; la *Scroll Pump*, la bomba de ionización y la bomba turbomolecular.

- *Scroll Pump*

La bomba seca de tipo *Scroll* la utilizamos para llegar a una presión de 10^{-3} torr, partiendo desde presión atmosférica. Una vez lograda esa presión, dado que esta bomba está conectada en serie con la bomba turbomolecular, ayuda a bombear gas proveniente de la turbomolecular cuando se pone en marcha.



Figura 9.4.1 Bomba previa seca SH-110 Dry Scroll Vacuum Pump

- Bomba turbomolecular

La bomba turbomolecular se pone en marcha cuando ya existe cierto vacío en el interior del sistema, dado que no puede bombear un gran caudal de flujo. Una vez puesta

en marcha, los materiales interiores empiezan a degasificar toda la suciedad que tienen, e incluso moléculas que se encuentran en los intersticios del material. Por ello, se tarda unas cuantas horas en lograr un vacío del orden de 10^{-7} torr en la cámara.

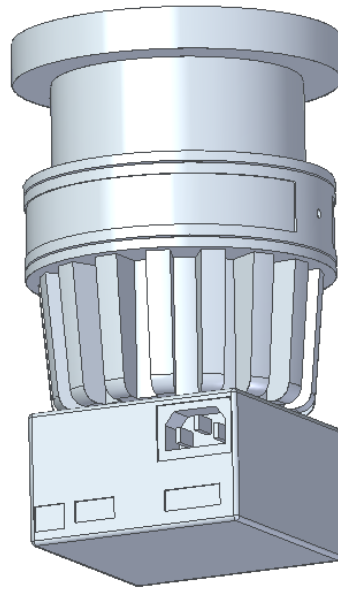


Figura 9.4.2 Bomba turbomolecular Varian

- Bomba de ionización

La bomba de ionización realiza la función de base de soporte en el sistema, así que está en todo momento en el interior del sistema. Esta cámara está provista de un collar de dos puertos (Figura 9.1.4) que dispone una tapa adicional, que mediante la acción de presión de la tapa sobre la base del collar, que acciona un mecanismo giratorio manipulado desde el exterior, se puede aislar del resto de la cámara. De esta forma, se logra un vacío continuo en la bomba, permitiendo que sus elementos internos mantengan una limpieza óptima.

Esta bomba se pone en funcionamiento cuando existe un alto vacío en el sistema, produciendo el ionizado de las moléculas de gas, almacenándolas en diferentes superficies disponibles (placas de tántalo o titanio).

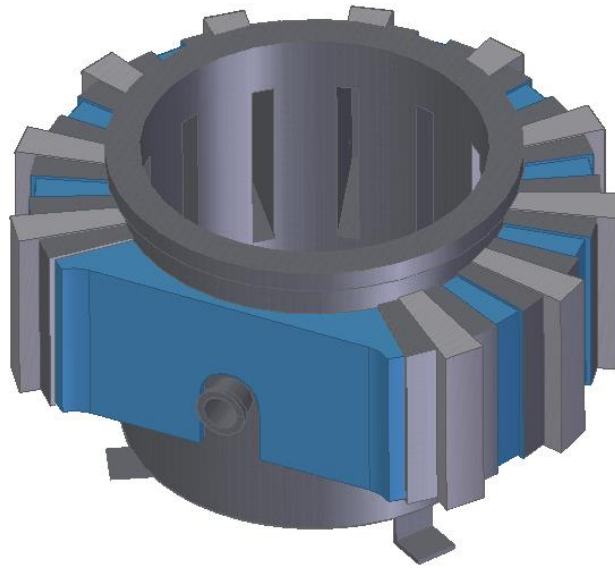


Figura 9.4.1 Bomba de ionización Perkin-Elmer Ultek

9.5. Medidores de presión

Se hacen uso de dos tipos de medidores de presión, según en el rango de presiones en el que estemos; el medidor por ionización y el medidor de presión ConvecTorr.

- Medidor de presión

Este medidor de presión se encuentra en todo momento midiendo la presión en el interior de la cámara. Su limitación es que al llegar a una presión de aproximadamente $1,3 \cdot 10^{-3}$ torr, y disminuir algo más la presión, el indicador no varía.



Figura 9.5.1 ConvecTorr Gauge

- Medidor por ionización

Este otro medidor de presión no está destinado a un uso continuado del mismo, al contrario que el anterior. Su uso está se centra en medir la presión en momentos puntuales, encendiéndolo durante aproximadamente un minuto y después apagándolo, dado que

cada vez que se enciende el filamento central se va consumiendo. Su propósito es encenderlo cuando la presión se encuentra en el rango de presiones de 10^{-3} a 10^{-8} torr.



Figura 9.5.2 Ionization gauge

9.6. Regulador de flujo

Se denomina en el presente trabajo regulador de flujo al dispositivo que se encarga de regular el caudal de gas que pasa por su interior. Con este dispositivo se puede cerrar un sistema o una parte del sistema del resto gracias a los elementos internos de los que dispone, ya que soportan grandes variaciones de presión con una fuga mínima.

9.7. Conjunto de la cámara de vacío

Reproducción en 3D a escala de la cámara de vacío, con el fin de adaptar nuestro dispositivo al volumen interior de la cámara. Se observa también la realización de un corte para ver el interior de la cámara, que es el lugar en el cual adaptaremos nuestro sistema.

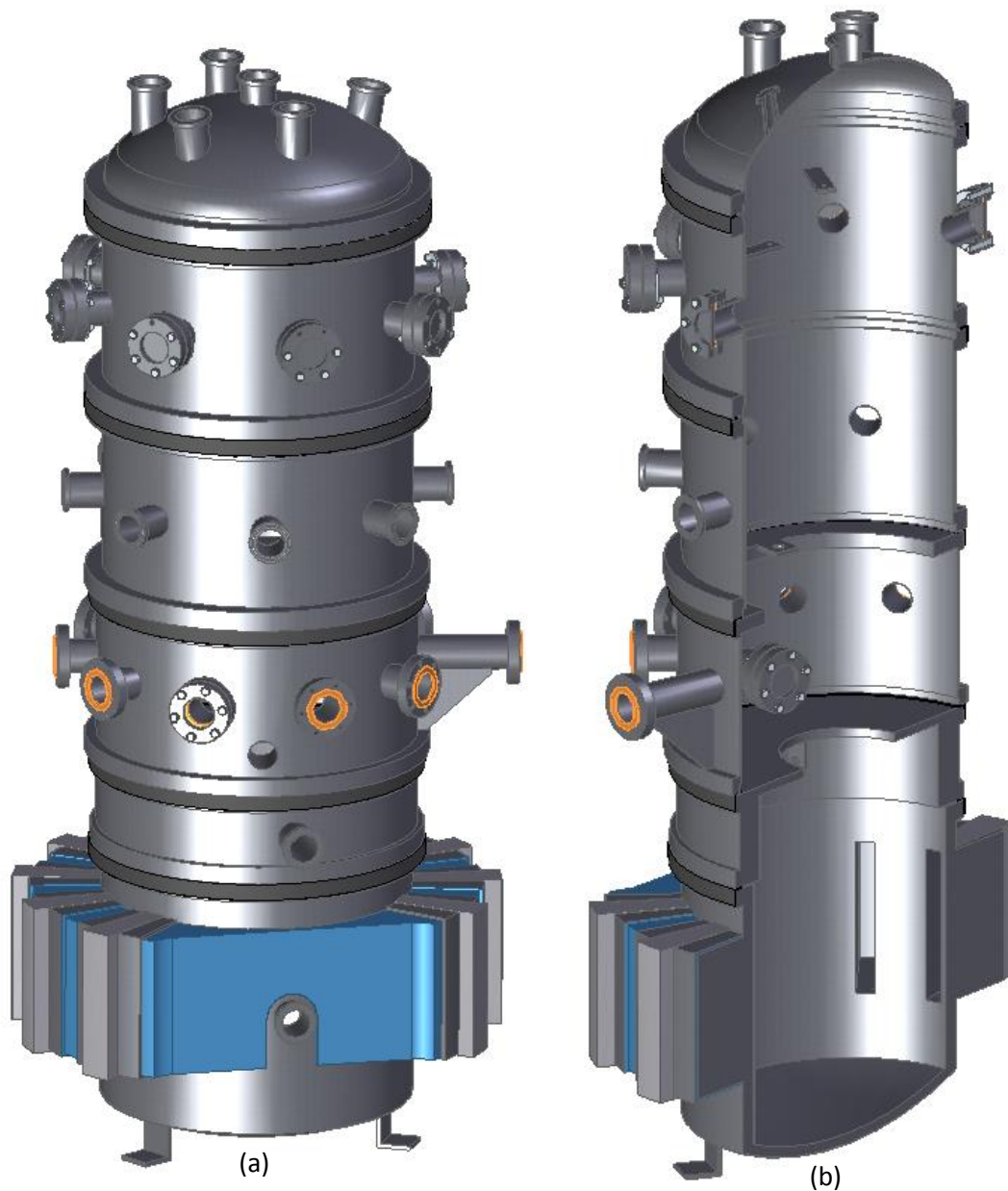


Figura 9.7 Cámara de vacío completa (a) y su corte transversal (b)

10. Puesta a punto de la cámara

Antes de realizar el diseño del sistema de deposición de materiales, se ha tenido que hacer una puesta a punto de la cámara de vacío que se encuentra en el laboratorio de física para verificar que el sistema del que disponemos funciona correctamente y poder operar con el dispositivo que posteriormente se va a diseñar.

10.1. Comprobación de la presión última de las bombas

Con el fin de comprobar cuál es la presión última alcanzable en nuestro sistema de vacío, se realiza una prueba preliminar de cada bomba, para tener una referencia de cuál debería ser la presión mínima alcanzable en nuestro sistema según el tipo de bomba empleada. Para ello se disponen las bombas de forma directa con el adecuado medidor de presión, realizando el vacío únicamente en el volumen entre la bomba y el medidor.

10.1.1. Bomba seca

Para comprobar la presión última de la bomba seca, se comprueba cual es la presión última según su manual de instrucciones. Posteriormente, se acopla la bomba directamente a la boca del medidor de presión ConvecTorr, anotando cual es la presión última que nos indica. Dado que en el manual apreciamos que la presión última indicada es de $6,6 \cdot 10^{-2}$ mbar, solo utilizamos este medidor de presión, ya que su límite ($1,3 \cdot 10^{-3}$ mbar) se encuentra aproximadamente en ese valor.

Se comprueban que no existen fugas vertiendo líquidos de baja presión de vapor en la junta de cobre o bien isopropanol en las de vitón, dado que esto haría subir la presión de forma que se pudiese apreciar en el medidor. Tras dejar la bomba en marcha durante 24 horas, se verifica que la presión mínima alcanzada es del valor mínimo límite del medidor de presión, por lo cual indica que la bomba seca funciona correctamente.

10.1.2. Bomba turbomolecular

Para la bomba turbomolecular la disposición varía de la anterior, ya que para su correcto funcionamiento es necesario conectar la bomba seca al puerto de salida de la bomba turbomolecular. Al igual que la bomba anterior, se comprueba la presión última del manual de instrucciones, que resulta tener un valor menor que $2 \cdot 10^{-9}$ mbar. Dado que este valor es notablemente inferior al rango de presiones que es capaz de medir el medidor de presión ConvecTorr, se utiliza el medidor por ionización conectándolo directamente a la boca de la bomba turbomolecular.

Tras comprobar que no existen fugas en el sistema con el vertido de líquidos con baja presión de vapor en las juntas, se comienza iniciando la bomba seca, dejándola en funcionamiento durante un tiempo 24 horas, certificando así que su valor de presión será igual a la presión última de la bomba seca.

Acto seguido, se inicia la bomba turbomolecular durante unos 10 minutos, y se comprueba la presión interior del sistema con el medidor de ionización. Tras realizar varias pruebas cada cierto tiempo, y asegurando que la presión interior deja de variar notoriamente, se anota la presión última lograda en el sistema, que resulta ser de un valor de $2,5 \cdot 10^{-7}$ torr.

10.1.3. Bomba de ionización

Para realizar la comprobación de la bomba de ionización, es necesario adquirir una fuente de tensión regulable, el cual no se dispone en el laboratorio de física. Así que no se realiza ninguna prueba de funcionamiento, por la falta de dicha fuente, y por haber detectado un problema con los imanes permanentes dispuesto en el perímetro de la bomba de ionización.

Nuestra bomba de ionización también dispone un dispositivo adicional en el puerto de salida inferior, que trata de un filamento de titanio que se pone a alta tensión. Este filamento se pone incandescente e vaporiza el vapor de agua que es depositado en su superficie, ya que el titanio tiende a formar compuestos con el vapor de agua.

Esta agua se condensa en la superficie interior de la cubierta de la cámara, ya al desprenderse en forma de gota cae al fondo. Durante la caída, la gota atrapa todas las moléculas de gas que encuentra a su paso y, al llegar al fondo, se quedan depositadas en modo de película de agua.

10.2. Búsqueda de fugas

Para realizar la búsqueda de fugas, se realizó un primer ensayo en toda la cámara, es decir, en la bomba de ionización (base de la cámara), en los collares de 8 puertos, en el collar de 2 puertos, en el collar de 10 puertos y en la cubierta lisa. Tras este ensayo, se comprobó que existían fugas dado que la presión última alcanzada en el interior de la cámara fue de $1,8 \cdot 10^{-2}$ mbar.

Para la localización de estas fugas, ya que no disponíamos de los medios necesarios de comprobación de fugas indicados en los antecedentes, utilizamos acetona para las juntas de cobre, e isopropanol para las juntas de vitón. Como se ha explicado anteriormente, estos líquidos al entrar en la cámara se evaporan fácilmente, dando lugar a un aumento de presión en el interior.

Tras realizar esta detección de fugas, se apretaron los tornillos necesarios, pero seguía habiendo fugas en el sistema. Por ello, para una comprobación más precisa, se decidió realizar un estudio más preciso analizando y tratando cada parte individualmente.

A la hora de separar los elementos, hubo un problema al separar dos collares de la junta de vitón intermedia. Para solucionarlo se realizó un apoyo adicional en la cámara que, accionado por un gato hidráulico, ejerció un empuje con la fuerza suficiente como para separar las dos partes.

Tras una limpieza exhaustiva de cada elemento con Alconox, y el uso de papel con acetona o isopropanol (dependiendo del material), se procede a la comprobación de fugas de cada elemento.

a) Bomba de ionización con cubierta lisa:

Parece ir todo bien, pero al no disponer de otro puerto de salida o de una T ISO-KF25, no es posible realizar una medida de presión.

b) Bomba de ionización, collar de 2 puertos y cubierta lisa:

Se realiza un vacío con la bomba seca a través de puerto inferior con acoplo de KF25, y da lugar a una presión interior de $1,3 \cdot 10^{-3}$ mbar. Por lo tanto se verifica que el collar de 2 puertos, la bomba de ionización y la cubierta lisa, así como sus juntas, no tienen fugas considerables.

- c) Bomba de ionización, collar de 2 puertos, collar de 10 puertos y cubierta lisa:

Realización de vacío y medición de presión en el interior de $1,3 \cdot 10^{-3}$ mbar. Tras 12h en parado se alcanza una presión de 5 mbar. En este momento, es interesante ver gráficamente el ritmo de producción de vacío y el ritmo de fugas.



Figura 10.2 Variación de presión de la cámara

Como se puede observar en la figura 10.2, el ritmo en el que la presión que va aumentando por causa de las fugas es insignificante comparada con la disminución de presión por causa de la bomba. De todas formas, estas fugas no son despreciables, dado que ocurren por algún hueco relativo al mal apriete de las juntas, lo cual es subsanable.

Las velocidades que se indican son la media de cada zona, es decir, la presión disminuye con una velocidad media de 160 mbar/h por la acción de la bomba, y cuando se apaga la bomba se aprecia una velocidad de variación de presión a causa de las fugas de 0,6 mbar/h

- d) Bomba de ionización, collar de 2 puertos, collar de 10 puertos, collar de 8 puertos y cubierta lisa:

La mínima presión alcanzada es de $8,3 \cdot 10^{-2}$ mbar. Tras sustituir una junta de cobre y apretar las juntas con sus respectivos tornillos alcanzamos la presión mínima esperada de $1,3 \cdot 10^{-3}$ mbar.

- e) Bomba de ionización, collar de 2 puertos, collar de 10 puertos, dos collares de 8 puertos y cubierta lisa:

Tras limpiar la cubierta y tapar todos los puertos de salida del collar, se comprueba que no existen fugas, y la presión mínima alcanzada es de $1,3 \cdot 10^{-3}$ mbar.

Una vez comprobado que el sistema de vacío del que se dispone no tiene fugas, o mejor dichos, las fugas que tiene son despreciables, podemos proceder a la limpieza de los elementos del sistema.

10.3. Limpieza de los componentes

Al disponer de un sistema operativo, se procede a la limpieza de cada uno de los elementos del sistema, con el fin de que en el momento de poner en marcha las bombas, no se deba esperar mucho tiempo hasta que los materiales degasifiquen la suciedad acumulada en sus superficies. Como cada material se debe limpiar de diferente manera, a continuación se describen las técnicas de limpieza que se utilizan para cada elemento.

f) Acero inoxidable AISI 304L y AISI 316L

Este material es el más utilizado en el sistema, ya que se encuentra formando la totalidad de los collares, base de la bomba de ionización, puertos de salida, cubiertas, celdas de Knudsen y elementos de acero adicionales del sistema. Para su limpieza, se realiza un primer lavado con Alconox, el cual elimina la mayor parte de la suciedad de los elementos.

Posteriormente se utiliza un cubo de agua destilada en el que se introducen los componentes más pequeños del sistema, y mediante el uso de ultrasonidos se favorece la limpieza del material.

Y por último, se realiza una pasada con un trozo de papel, o con un trapo sintético (siempre con el uso de guantes de vinilo) cubierto por acetona sobre las superficies del material a limpiar.

g) Tántalo y titanio

La descripción del proceso de limpieza que se ha utilizado para estos materiales se describe en los antecedentes. Estos materiales se encuentran como placas en la bomba de ionización, y es donde van a para la mayoría de la moléculas ionizadas, por lo cual, se trata de una superficie que se debe limpiar cada vez que se ponga en funcionamiento la bomba de ionización.

En el laboratorio se realizó únicamente la limpieza de una placa de titanio y de otra de tántalo, ya que el proceso y los químicos que se emplean son costosos, se decidió no realizar la limpieza de todas las placas hasta el momento que se fuesen a utilizar. De esta forma se evita que se acumule suciedad en la superficie que dé lugar a tiempos de degasificación más largos.

h) Juntas de cobre y de vitón

En el caso de las juntas de cobre, se realiza simplemente una limpieza con un trapo sintético o un trozo de papel con acetona, pasándolo por la superficie usando guantes de vinilo.

En cambio, para limpiar juntas de vitón, dado que la acetona da lugar a una reacción química que disuelve el polímero de fluorocarbono (material de la junta de vitón), se utiliza isopropanol aplicándolo directamente en la superficie. De esta forma se realiza la limpieza de las juntas, que es conveniente realizarla siempre que se realice la apertura de la cámara.

10.4. Degasificación de los elementos

Dado que todos los materiales del sistema tienen suciedad en la superficie, la velocidad a la que ocurre la disminución de presión es relativamente lenta. Para evitar unos tiempos de espera largos se realiza un tratamiento *bakeout*, que es un tratamiento que acelera la degasificación.

Este proceso trata en un horneado, consiste en calentar los elementos del sistema (en nuestro caso los collares) por medio de unos collares calefactores, que calientan la cámara a alta temperatura, alrededor de 250 °C a 400 °C para degasificar. En nuestro sistema el horneado se realiza a 100 °C ya que la temperatura del sistema está limitado por las juntas de vitón, dado que a aproximadamente 150 °C el polímero de fluorocarbono empieza a descomponerse, y deja de ser impermeable a los gases, perdiendo sus propiedades de aislamiento. Debido a este motivo, el sello hermético al vacío suele estar hecho de materiales resistentes a alta temperatura.

La bomba seca se pone en funcionamiento desde el principio, y se comienza a calentar la cámara lo más uniformemente posible con el uso de hasta 3 collares calefactores diferentes. Una vez alcanzada la temperatura de 100 °C, se mantiene durante 1 o 2 días, produciendo la degasificación de la mayor suciedad posible.

Finalmente, se enfría la cámara, y se puede comprobar que la presión última del sistema es menor que la presión última antes de realizar el proceso de horneado.

11. Diseño del sistema de deposición de materiales

El sistema está dividido en dos zonas, la zona alta y la zona baja.

En la zona baja, mediante un sistema de tipo carrusel puede seleccionarse el material a evaporar de entre 8 posibles. El proceso de evaporación se realiza bien mediante corrientes eléctricas calefactoras a través de filamentos de tungsteno o botes de tántalo o de molibdeno, o bien mediante radiación de microondas, absorbidas por crisoles adecuados en los que se alojan los materiales a evaporar.

En la zona alta, en cambio, el material en fase vapor de la zona baja atraviesa un sistema de máscaras de sombra que permite la deposición del material sobre el sustrato en diferentes geometrías de tamaño milimétrico. Este sistema permite la selección de la máscara apropiada, que se posiciona de manera automatizada bajo el sustrato. El sustrato está alojado en un porta-sustratos intercambiable, de fácil inserción en el sistema, cuya temperatura puede regularse desde $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, mediante un reservorio de nitrógeno líquido, hasta $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, mediante calentamiento por radiación.

Un obturador rotatorio a modo de disco con sectores de diferente apertura, ubicado entre la fuente de vapor y el sustrato, permite variar el espesor de la película en diferentes zonas del sustrato. El sistema está diseñado para poder aprovisionar el mismo con medidores de espesor (cristal de cuarzo) para monitorizar el ritmo de crecimiento y el espesor de la película y con un electroimán para inducir anisotropía magnética en el material.

11.1. Diseño de la zona baja

11.1.1. Objetivo

Lo que se pretende conseguir con el diseño de esta zona baja es disponer de un sistema con el mayor espacio posible para poder incluir la mayor cantidad de fuentes de evaporación en una base, y así poder realizar la evaporación de diferentes elementos sin la necesidad de abrir la cámara.

También se estudia la posibilidad de realizar la evaporación con diferentes fuentes individuales, pudiendo lograr la coevaporación de materiales, es decir, la evaporación de dos materiales diferentes o más para lograr una película delgada de un material compuesto.

Otro objeto del dispositivo es utilizar la evaporación de materiales mediante el uso de microondas, lo cual es algo que no se ha estudiado todavía en los sistema de vacío o alto vacío.

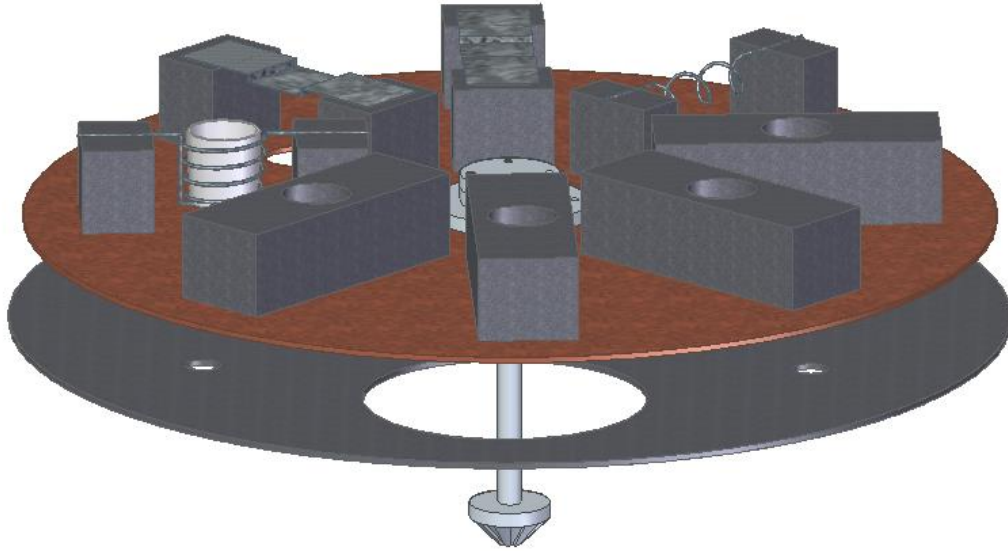


Figura 11.1.1 Carrusel de la zona baja

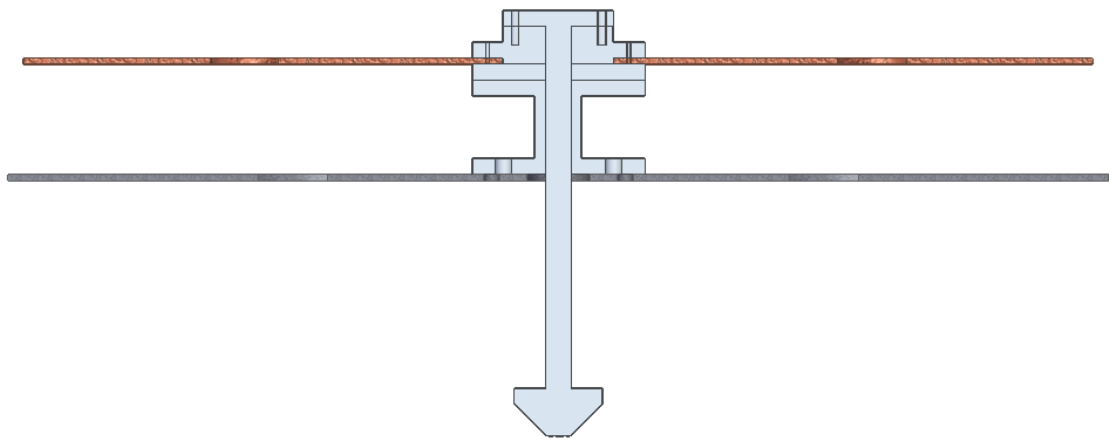


Figura 11.1.2 Corte del carrusel de la zona baja

11.1.2. Mecanismo

Se ha pensado en un mecanismo lo más sencillo posible pretendiendo tener la menor cantidad de piezas posibles, y lograr así minimizar los fallos posibles en el sistema.

El sistema consta de un carrusel fijo anclado a las pestañas de un collar de la cámara, proporcionando estabilidad y ejerciendo de base del sistema. Por el centro de esta base se encuentra un eje (figura 11.1.2.1) con un agrandamiento en el extremo superior para evitar que el eje deslice verticalmente. En la parte inferior del eje se coloca un engranaje cónico que engrana con otro engranaje cónico dispuesto en un eje horizontal (figura 11.1.2.2). De esta forma se consigue rotar manualmente el eje central desde el exterior de la cámara, con el uso de un accionamiento que traspasa un pasamuros de transmisión de potencia.

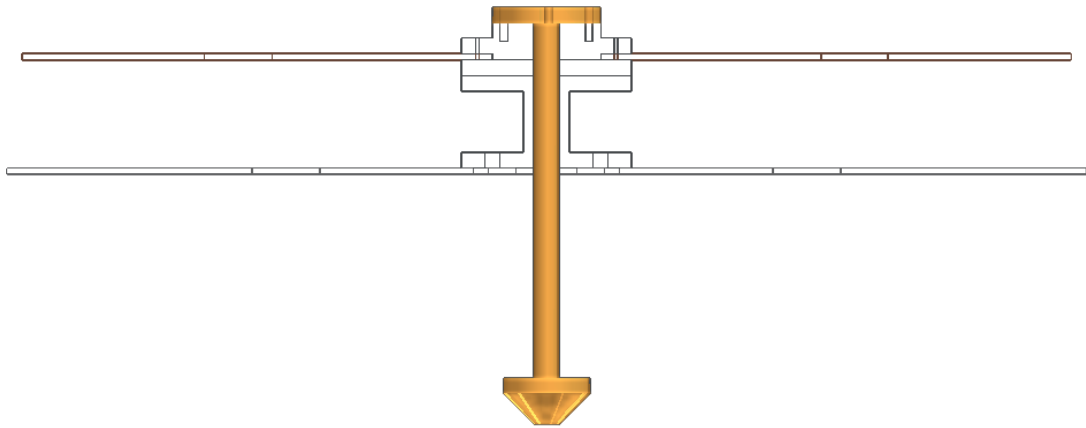


Figura 11.1.2.1 Eje del carrusel con engranaje cónico

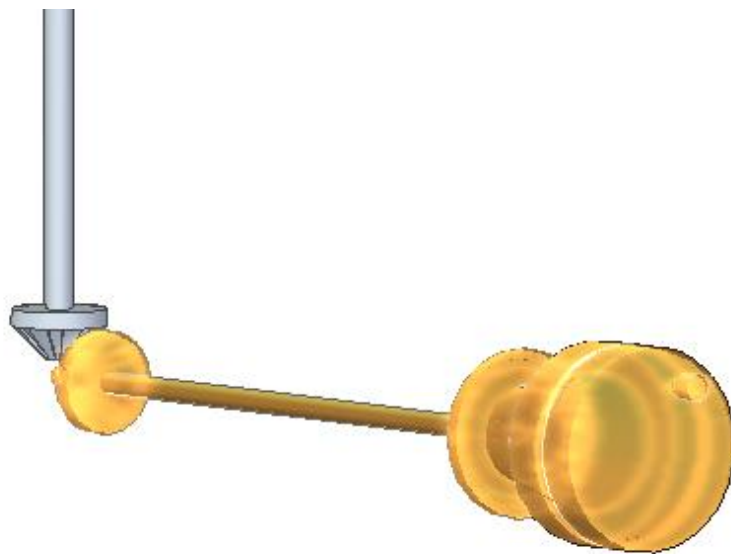


Figura 11.1.2.2 Eje horizontal con engranaje cónico

Se posiciona un casquillo (figura 11.1.2.3) de acero inoxidable o un material plástico con muy baja degasificación sobre el carrusel fijo, anclándolo mediante tornillos a la base. Se le proporciona una altura de tal forma que deje espacio para introducir o hacer pasar cables entre el carrusel fijo y el carrusel móvil.

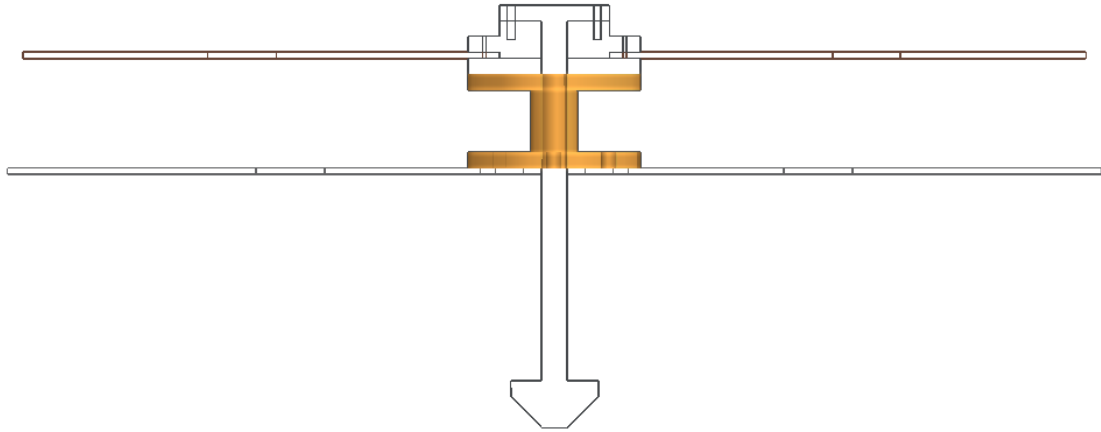


Figura 11.1.2.3 Casquillo del mecanismo

Sobre este casquillo se coloca un rodamiento de bolas cerámico (figura 11.1.2.4), ya que no usa aceites de lubricación lo cual podría causar una sublimación de este aceite. Este rodamiento se posa en el casquillo y se fija inferior mediante tornillos introducidos por la parte inferior.

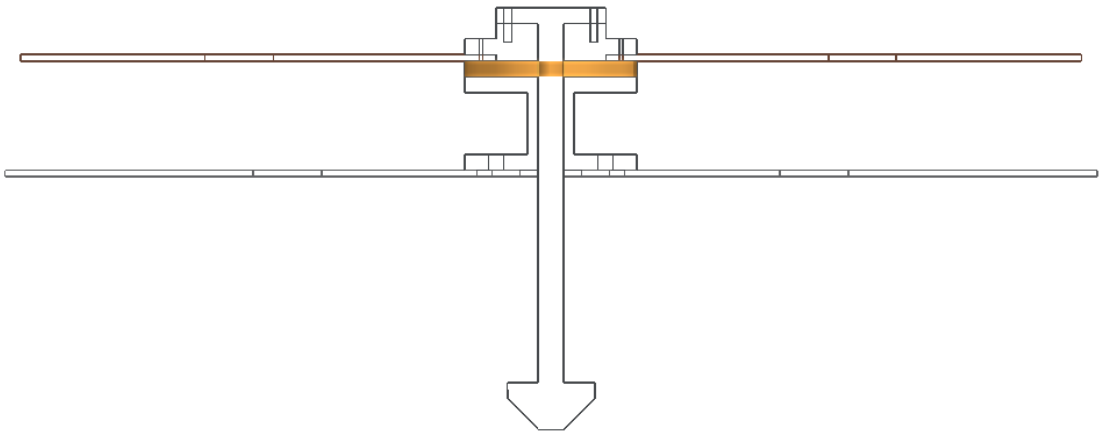


Figura 11.1.2.4 Representación del rodamiento de bolas cerámico



Figura 11.1.2.5 Rodamiento de bolas cerámico

Sobre este rodamiento se coloca el carrusel móvil, que está hecho de cobre, y es la base donde se posicionan las fuentes de evaporación existentes en nuestro sistema.

Por último, se coloca un separador de nylon (figura 11.1.2.6) entre el carrusel móvil y el agrandamiento del eje central. El separador es de este material debido a que se pretende aislar el carrusel móvil del eje, ya que el carrusel móvil se va a poner a alta tensión y puedan surgir cortocircuitos. Este separador va anclado por una parte al carrusel móvil, y por otra parte al agrandamiento del eje central.

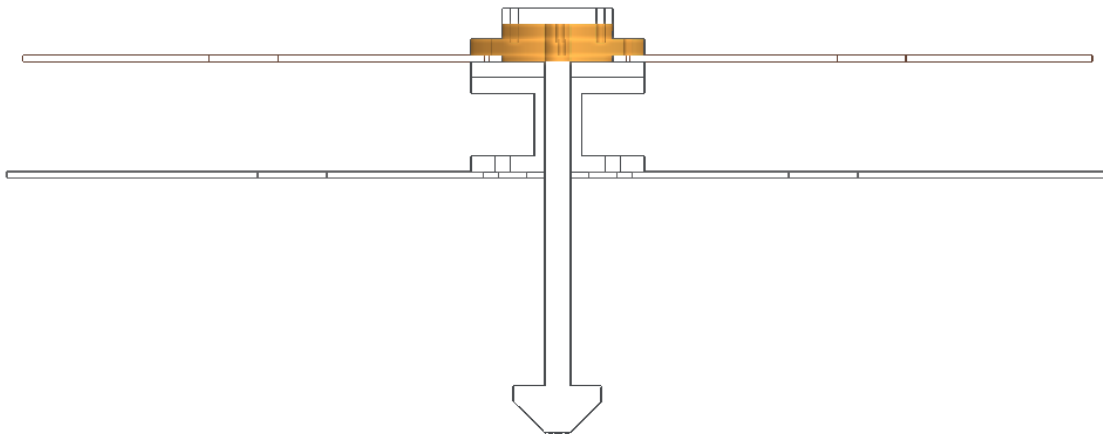


Figura 11.1.2.7 Separador de nylon

11.1.3. Carrusel fijo

El carrusel fijo es una placa circular de acero inoxidable, de un espesor de 2 mm y dispone de varios agujeros para que se pueda anclar mediante tornillos a las pestañas entrantes de la cámara. También dispone de unos agujeros más grandes para disminuir el peso de la plancha y para tener la posibilidad de pasar cables y elementos del dispositivo de vacío por su interior.

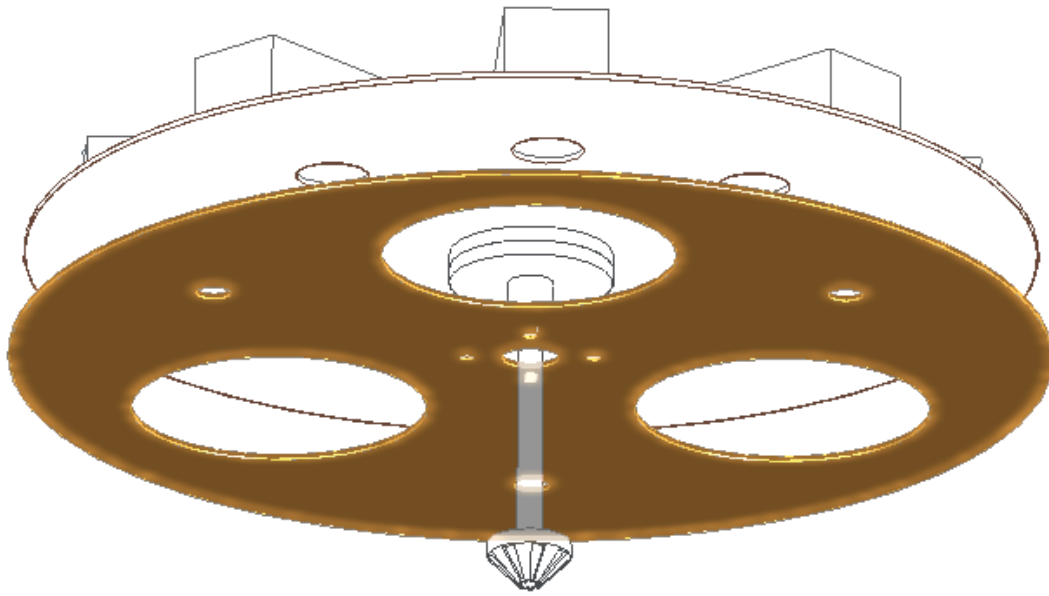


Figura 11.1.3 Carrusel fijo

11.1.4. Carrusel móvil

El carrusel móvil es una plancha redonda de cobre, que tiene un espesor de 2 mm y tiene varios agujeros para que se pueda fijar al separador, y otros agujeros más grandes que sirven como orificio para introducir el dispositivo de evaporación por microondas.

Esta placa está hecha de cobre (por su buena conductividad eléctrica) debido a que cuando se requiere realizar la evaporación de materiales mediante el uso de fuentes que no sean de microondas, toda la placa se pone a alta tensión, y mediante el contacto directo de esta placa con el borne interior de las fuentes de evaporación se consigue transmitir esta alta tensión a un borne de la fuente.

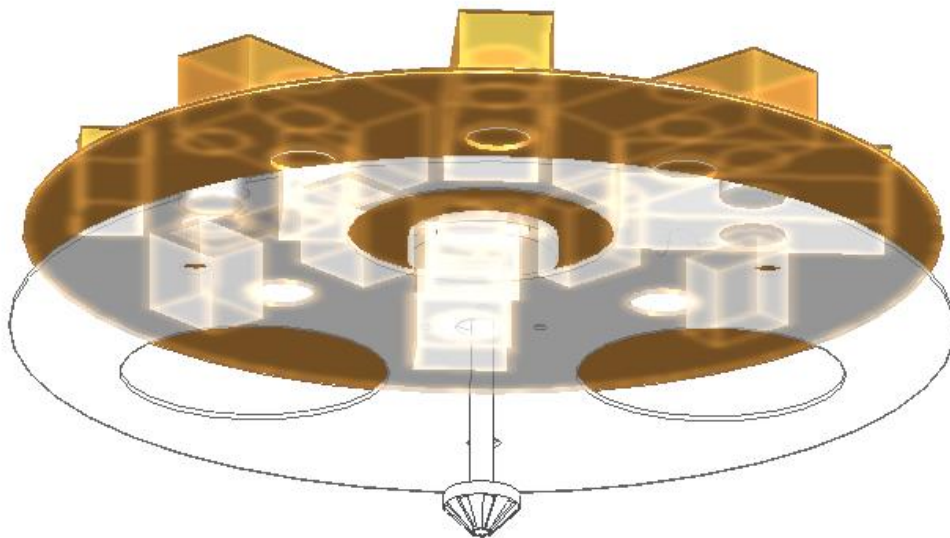


Figura 11.1.4 Carrusel móvil

11.1.5. Sistemas de evaporación

Este tipo de dispositivo nos permite realizar la coevaporación o evaporación de materiales mediante la combinación de diferentes medios de evaporación. Este sistema está formado por cuatro tipos diferentes de evaporación de materiales que están dispuestos como se indica en la figura 11.1.5.1.

Una selección de materiales podría ser el magnesio, el cromo, el óxido de silicio, el aluminio, el hierro, el cobalto, el níquel y el cobre. Colocando cada uno de estos metales en los calentadores adecuados se puede lograr la coevaporación, debido a que se utilizan varios sistemas de calentamiento simultáneamente.

Las fuentes de evaporación se han dispuesto en una formación lo más centrada posible, dado que en el momento de realizar la evaporación de los metales se requiere que los materiales evaporen lo más centradamente posible, por causa de la posición centrada del substrato.

Se estudiaron diferentes disposiciones de las fuentes, pero a causa de la necesidad de poder realizar la coevaporación, se dedujo que un carrusel es el mecanismo más sencillo posible.

Variando la posición del carrusel se puede lograr evaporar solamente un material de los 8 posibles, o realizar una coevaporación de dos materiales en una variedad de 10 combinaciones diferentes. Por medio de una segunda fuente de microondas, se podría realizar otra coevaporación, pero en este caso, de tres materiales diferentes.

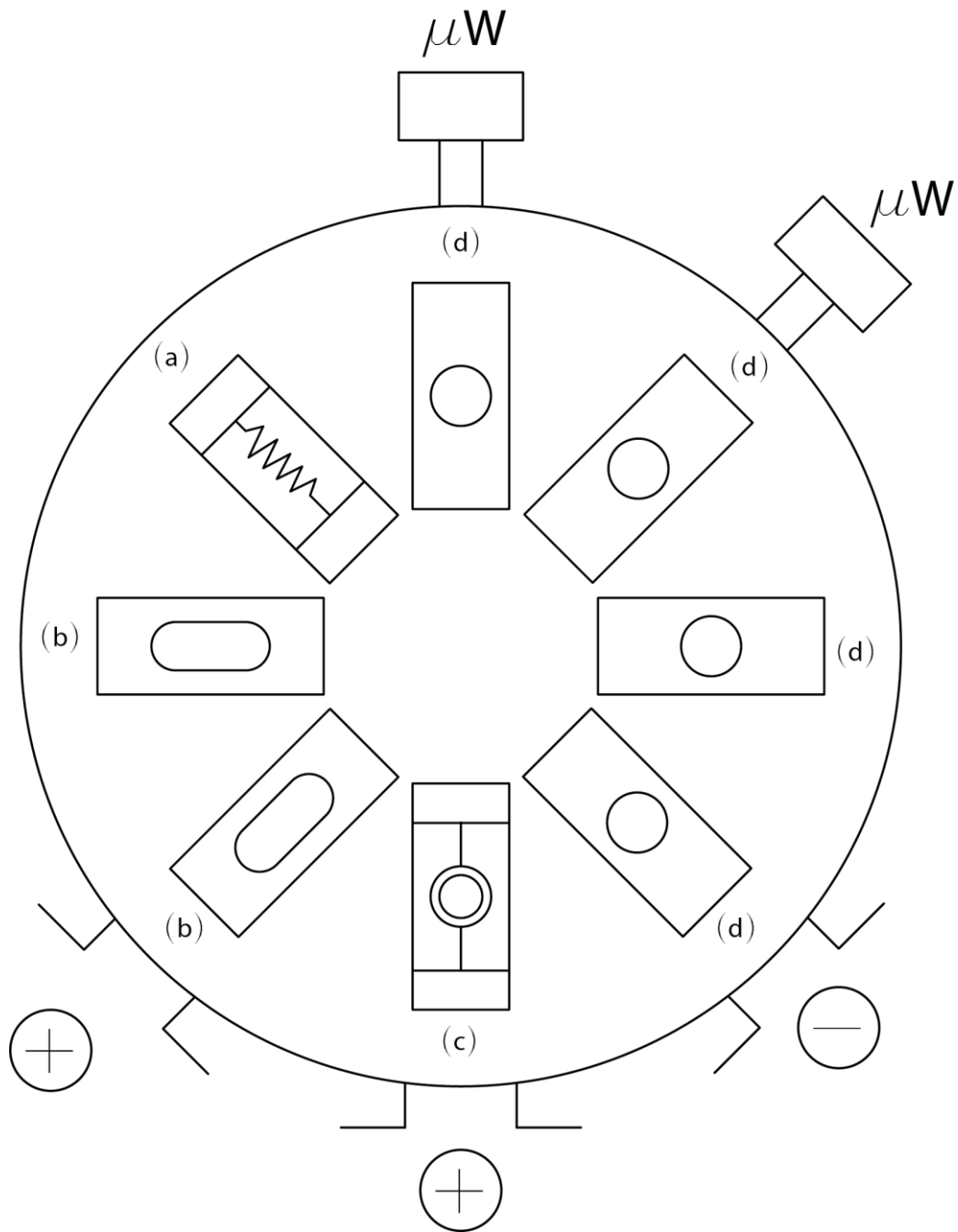


Figura 11.1.5.1 Disposición de las diferentes fuentes de evaporación y las conexiones accesibles en cada ángulo de giro

a) Filamento de tungsteno

Este tipo de calentador es de los más usados en el mercado debido a su bajo coste, se suele desechar después de su uso. El funcionamiento consiste en hacer pasar una corriente por el interior del filamento produciéndose su calentamiento. El material que se pretende evaporar tiene forma de gancho, y se cuelga en la parte baja del filamento helicoidal. De esta forma, puesto que el filamento de tungsteno tiene una presión de vapor considerablemente baja, el filamento logra altas temperaturas hasta evaporar el material que está colgando de él.



Figura 11.1.5.1 Filamentos de tungsteno

Para activar este dispositivo se utiliza una fuente de tensión de alto voltaje (10-50 V_{AC}) y alta intensidad (35-50 A_{AC}), y se conecta directamente a la base móvil del carrusel, que está a su vez conectado con un extremo del filamento. Para cerrar el circuito, el carrusel gira hasta que el borne que está sujeto el otro extremo del filamento se hace coincidir con una pestaña saliente fija de un collar de la cámara.

Cuando el carrusel se encuentre en la posición indicada se podrá proceder al calentamiento del filamento y a la evaporación del material elegido.

b) Calentadores de cesta

Los calentadores de cesta utilizan el mismo funcionamiento que los filamentos de tungsteno y suelen estar hechos de tántalo, dado que aguanta muy bien las altas temperaturas.

Estas fuentes de evaporación son láminas dobladas con una hendidura en el centro de la lámina, en la cual se deposita el material a evaporar. En lugar de pasar la corriente por un filamento se pasa por toda la superficie de la lámina, calentando de esta forma el material elegido.



Figura 11.1.5.2

c) Evaporación en crisoles

Este tipo de fuentes consta de dos partes de materiales totalmente distintos. La primera parte es un filamento de tungsteno con forma helicoidal cónica. La segunda parte se coloca sobre esta primera, y es un cuenco de nitruro de boro, vidrio u otro material similar en el cual se introduce el material que se requiera evaporar.

El calentamiento del metal de evaporación es diferente a los anteriores, dado que su calentamiento es por conducción. Se hace circular una corriente a través del filamento helicoidal, y esta corriente emite calor por contacto que calienta el material a evaporar.

Se utiliza nitruro de boro por ser uno de los compuestos que resiste alta temperatura y baja reactividad química con la mayor parte de los elementos (típicamente magnesio, galio, etc.).



Figura 11.1.5.3 Disposición del crisol en el filamento calentador por conducción

d) Evaporación por microondas

La evaporación por microondas consiste en insertar en un cubículo cerrado microondas para calentar un crisol de grafito, que es la base donde se va a apoyar el material que se requiera evaporar. La frecuencia a la que se disparan las microondas es de 254 GHz, que coincide con la frecuencia que usan las microondas normales para evaporar el agua. Estas frecuencias también las absorbe el grafito, que es calentado por la radiación de éstas.

11.2. Diseño de la zona alta

La parte que se ha denominado como zona alta es una variedad de dispositivos que operan individualmente, con el fin de lograr una deposición en fase vapor de los materiales evaporados en la zona baja a gusto del operario.

Cada dispositivo tiene un objetivo que modifica la forma de deposición de los materiales, variando su espesor, forma y tipo de película delgada.

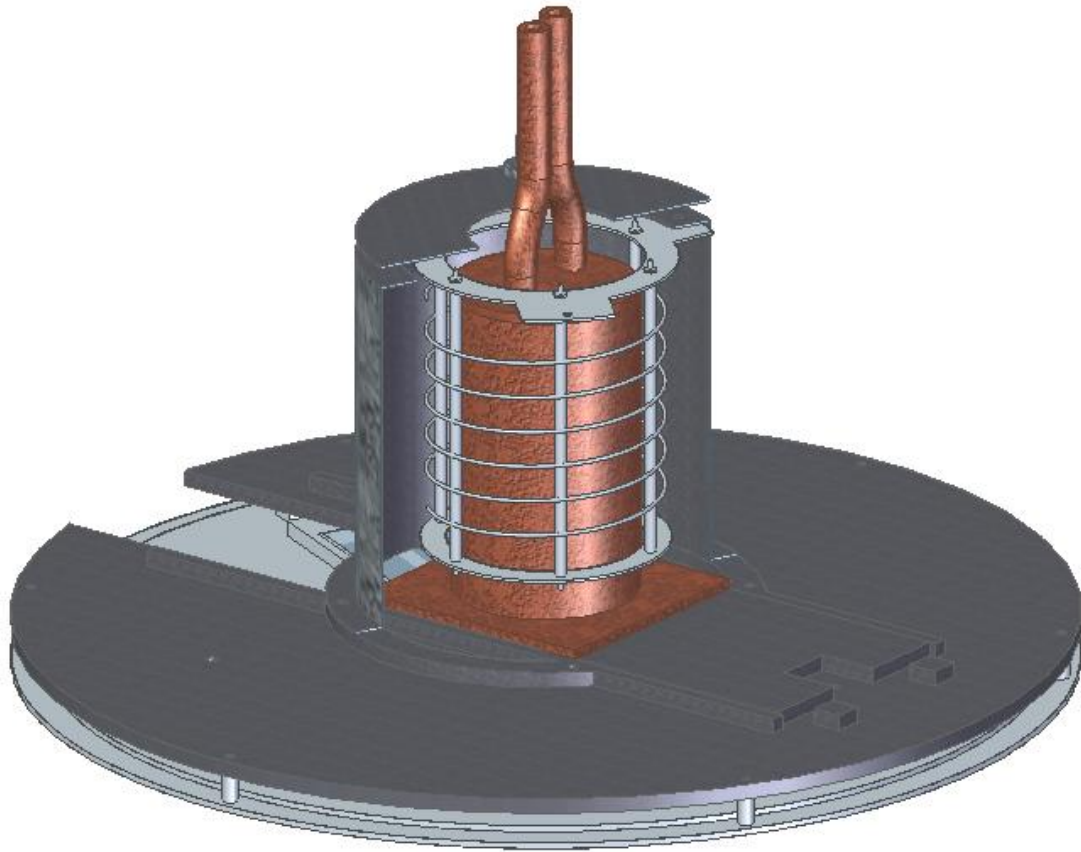


Figura 11.2.1.1 Sistema de la zona alta

11.2.1. Reservorio y calefactor

- **Objetivo**

El objetivo de este sistema compuesto por dos dispositivos es regular la temperatura del sustrato para controlar la deposición física en fase vapor. Se plantea el enfriamiento del sustrato mediante el uso de un reservorio de nitrógeno líquido, y un calentamiento del sustrato por radiación con el paso de corriente por un alambre helicoidal situado en el exterior del reservorio.

Se introduce una placa adicional en el sistema con el cual se pueda controlar el inicio y final de la deposición de los materiales evaporados. Esta placa empuja el portasustratos que contiene el sustrato para posicionarla en el lugar adecuado.

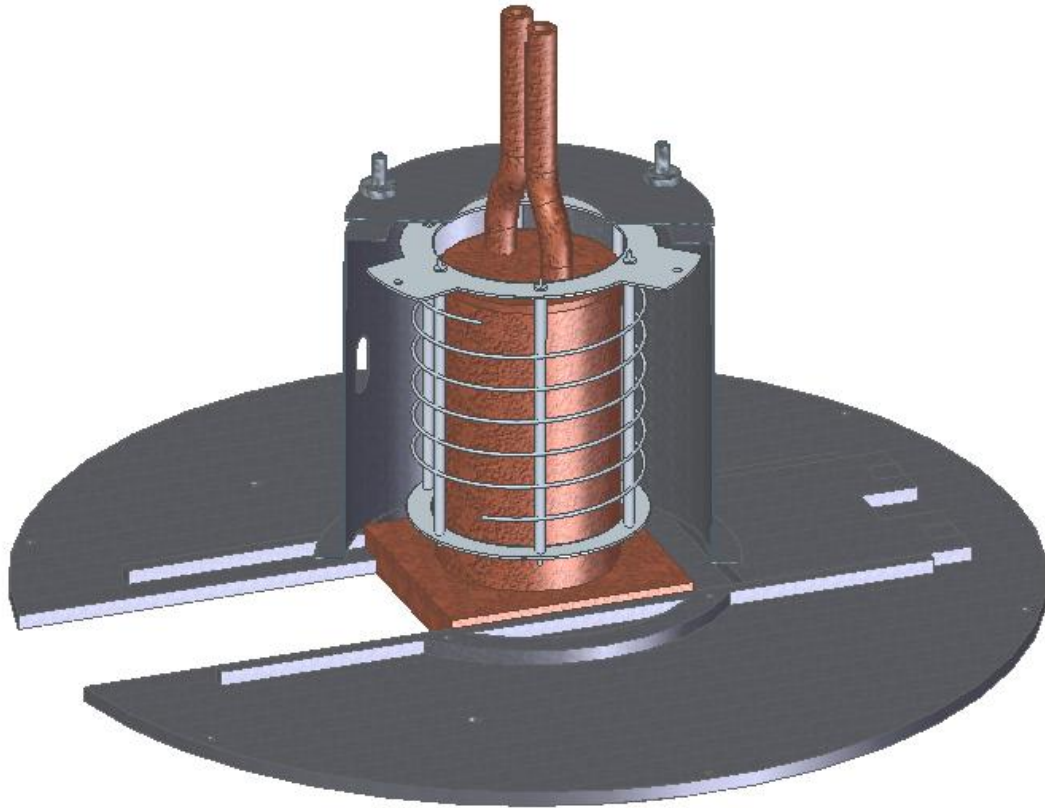


Figura 11.2.1.2 Sistema de regulación de temperatura

● Diseño del reservorio

Para el diseño del reservorio, se pensó en un sistema lo más sencillo posible que tuviese una entrada y una salida de nitrógeno líquido con el cual se pudiese hacer circular un flujo que enfriase la base del reservorio. Esta base apoya directamente sobre el portasubstrato, y dado que todos estos elementos están hechos de cobre, se consigue una muy buena conductancia térmica.

Para realizar la unión de todas las partes del reservorio es necesaria una unión correcta mediante soldadura, con la cual no se creen huecos y no se colabore con la degasificación. Las partes que se deben soldar son los tubos de diferente longitud que se introducen por la parte superior del reservorio, la tapa del reservorio con sus correspondientes agujeros, el tubo en forma de cilindro que forma la pared del reservorio y la base de este tubo.

El portasubstrato está hecho de cobre para poder transmitir el frío del reservorio al substrato que tiene en su interior. De esta forma, se consigue enfriar el substrato cuando sea necesario y, puesto que la base del reservorio no está soldado al portasubstrato, es posible el desplazamiento relativo del portasubstrato para iniciar o cesar la conducción térmica.

El reservorio se compone de dos tubos, uno más largo que el otro, con el fin de conseguir un enfriamiento más efectivo. Se inicia introduciendo el nitrógeno líquido por el tubo largo, y consiguiendo así una proximidad a la base del reservorio para una

transmisión de frío mejor. Conforme el nitrógeno va aumentando de altura, gana energía calentándose, y se extrae por el tubo corto cuando llega a la tapa del reservorio.

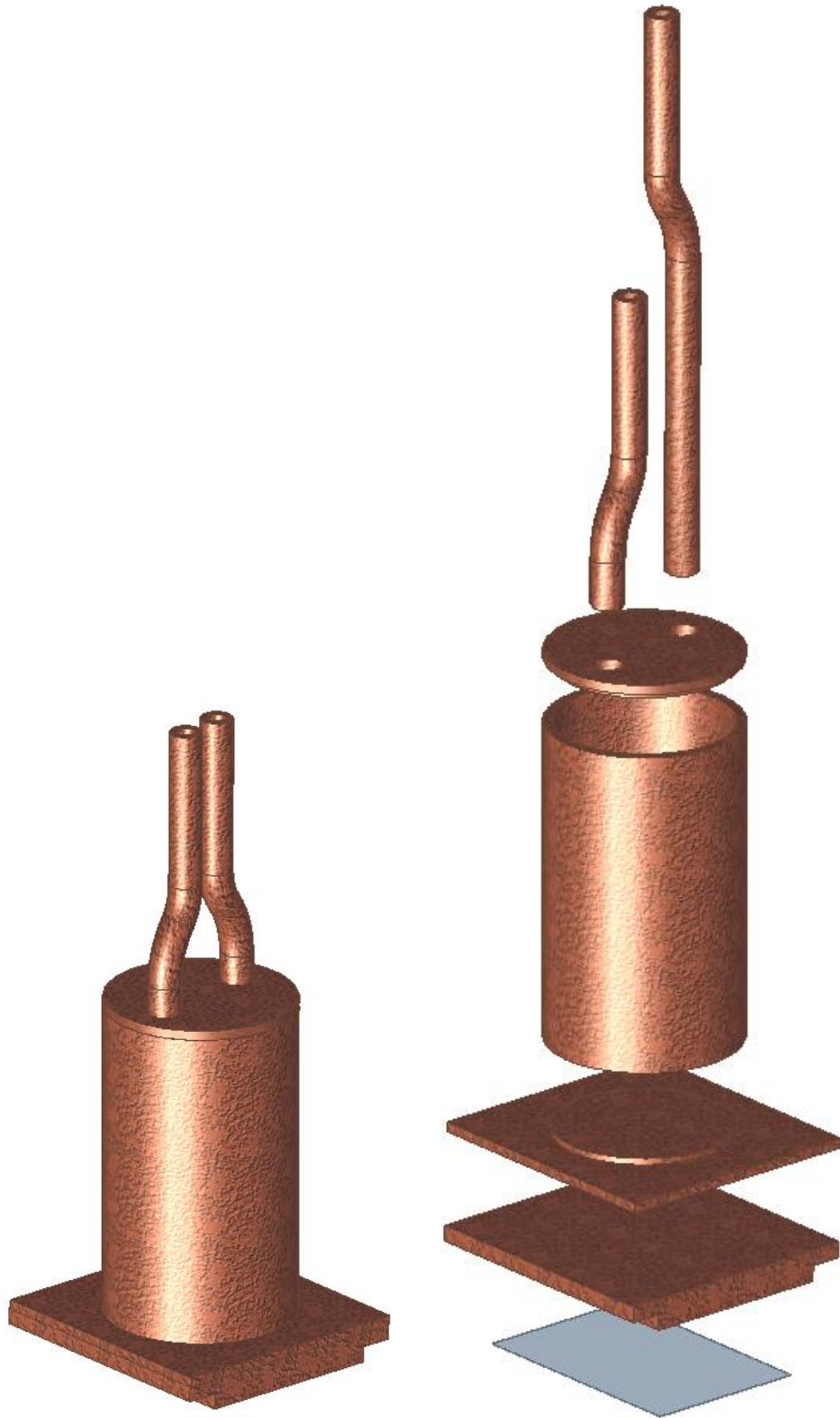


Figura 11.2.1.4 Reservorio y su vista explosionada

- **Diseño del calentador**

El calentador, al contrario que el reservorio, tiene como finalidad calentar el sustrato. Para su funcionamiento se ha dispuesto una espiral de tungsteno alrededor de unas barras verticales de acero, protegidas con unos cilindros cerámicos para evitar el contacto directo. En el centro de esta espiral se coloca el reservorio, y mediante el flujo de una corriente que circula a través de alambre se consigue calentar el reservorio de cobre central.

También incluye un caparazón de acero inoxidable, que protege este filamento de tungsteno de los materiales evaporados en la cámara. Este caparazón va fijado mediante unos tornillos a la sujeción del alambre en espiral, y también va fijado a la placa base superior.

Se consigue mediante este método de calefacción calentar el reservorio de cobre, y que éste caliente mediante conducción térmica el calor al portasustrato y, finalmente, el sustrato.

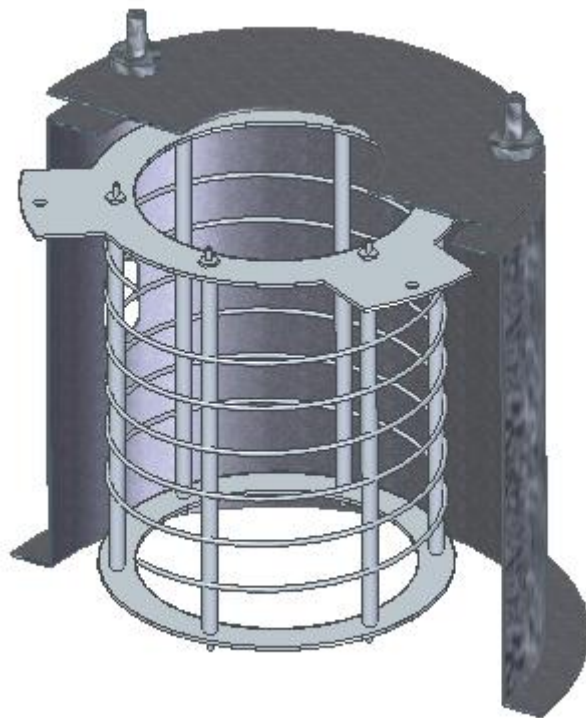


Figura 11.2.1.5 Sistema de calefacción

11.2.2. Sistema base

- **Objetivo**

Sirve como soporte de todos los dispositivos de la zona alta, y es el lugar donde se realiza el desplazamiento del portasustrato. Dispone de una placa supletoria que se desliza simultáneamente con el deslizamiento del portasustrato, de esta forma, se

puede parar la deposición de materiales reemplazando el portasubstrato (que es la fuente receptora) por la placa supletoria.

La placa base superior tiene soldados en su superficie superior unos railes que sirven para guiar al portasubstrato y a la placa supletoria, y también para ser utilizada como apoyo del caparazón del dispositivo calentador anteriormente definido. Todos los anclajes al caparazón están elaborados por el uso de elementos de tornillería, para que puedan ser desmontables.

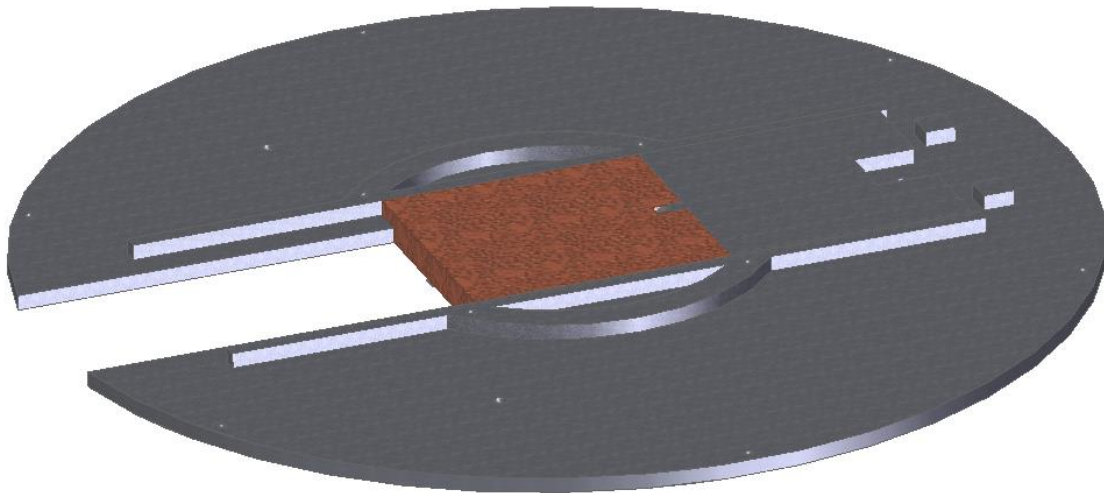


Figura 11.2.2.1 Sistema base

● Diseño

El diseño realizado para este dispositivo ha sido desarrollado para ser totalmente desmontable, en caso de que fuese necesaria una limpieza o la sustitución de algún elemento defectuoso.

- Portasubstrato

Este elemento es el responsable de transmitir por conducción el calor que proviene de la base del reservorio de cobre al sustrato, que suele ser un vidrio de un espesor de en el rango típico de 0,2 a 1 mm.

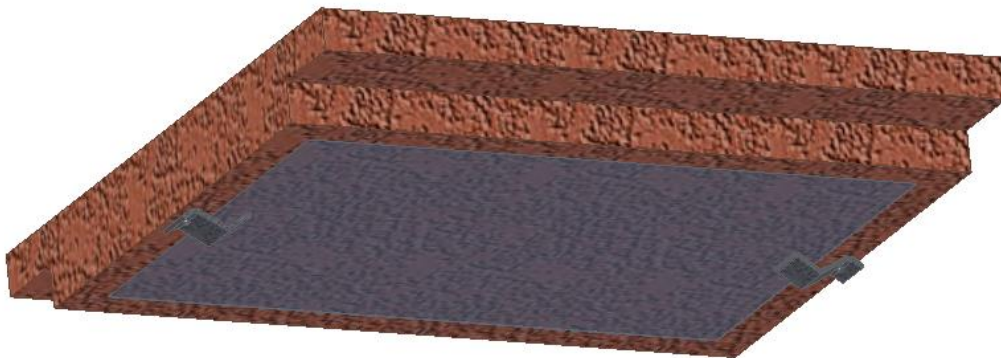


Figura 11.2.2.2 Portasubstrato desde abajo

Este vidrio se ha insertado en un pequeño desnivel con su forma y está sujeto por dos pestañas metálicas, que ejercen la fuerza suficiente como para mantener el substrato en la posición adecuada.

También dispone de una especie de aletas laterales, que son las que guían al portasubstrato por los raíles de la placa base superior. Estas aletas se han desarrollado con el fin de que al realizar la sustitución por deslizamiento del portasubstrato por la placa supletoria, coincida exactamente con la parte superior del portasubstrato, evitando crear un escalón entre estas dos placas. Este escalón se debe evitar porque siempre existirá una fuerza vertical hacía abajo a causa del peso de todos los elementos del reservorio.

Como se observa en la figura 11.2.2.3, el enlace entre la placa supletoria y el portasubstrato se realiza mediante un enganche de la placa supletoria que penetra en un orificio de las mismas dimensiones del portasubstrato.

Al realizar el sistema de esta forma, si se extraen estas dos placas es posible realizar la retirada del reservorio por el hueco central de la placa base superior.

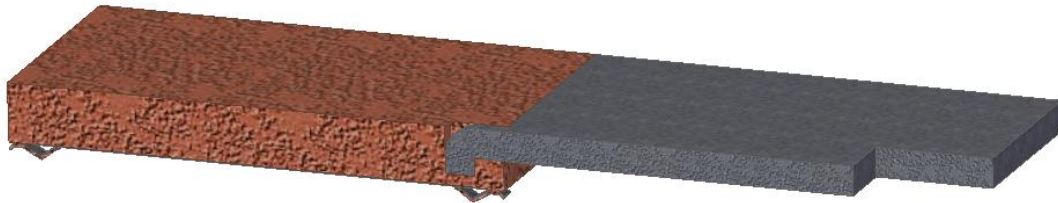


Figura 11.2.2.3 Corte del detalle de enganche entre placas

11.2.3. Sistema de máscaras de sombra

- **Objetivo**

La finalidad de realizar un sistema completo y complicado de máscaras de sombra es tener la posibilidad de hacer la deposición física en fase vapor de materiales en diferentes geometrías sin tener la necesidad de abrir la cámara de vacío. Para ello, se ha estudiado un sistema complejo con el cual se realiza la sustitución de las máscaras de sombra con el simple giro de un carrusel accionado por un servomotor situado en el exterior de la cámara.

- **Diseño**

El diseño que se ha planteado es tener la posibilidad de realizar el reemplazo de 6 diferentes máscaras de vacío, situadas en los extremos exteriores de un disco. Para ello el sistema que se ha estudiado es que realizando un simple movimiento rotatorio, los portamáscaras se colocan en el agujero central, permitiendo solamente el flujo del gas en estado vapor por las aperturas milimétricas con geometrías diversas de las máscaras.

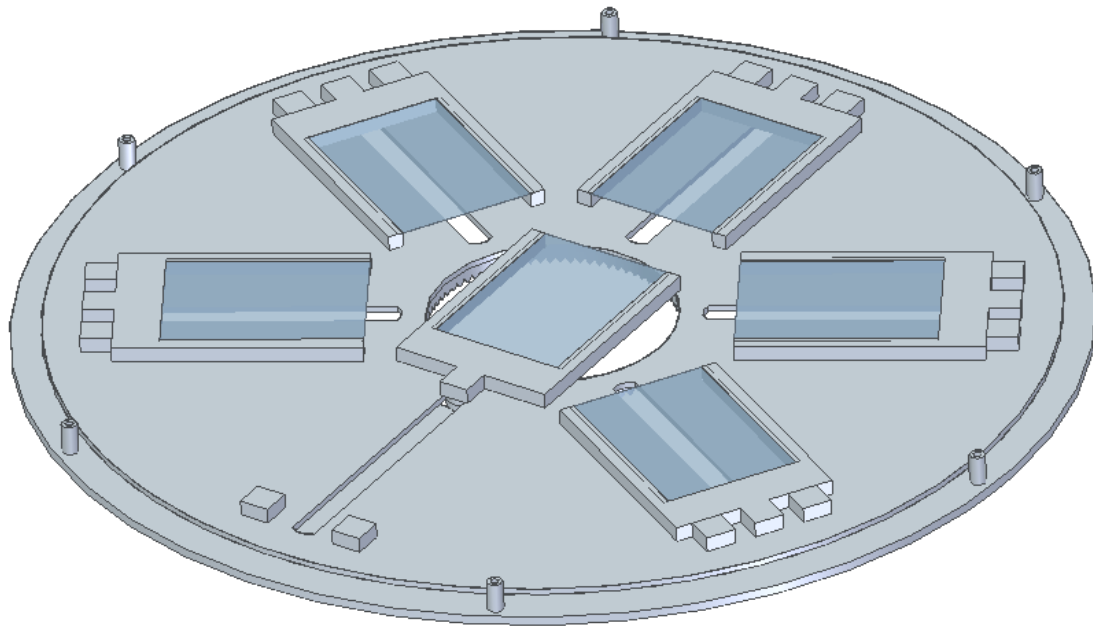


Figura 11.2.3.1 Sistema de máscaras de sombra

Estas máscaras de sombra se encuentran situadas en la zona más alta posible de un portamáscaras, con el objetivo de que la distancia entre la máscara y el sustrato sea lo más pequeña posible minimizando el error. Para el movimiento de los portamáscaras, se le habilita un cilindro en la zona inferior, que tiene un estrechamiento en la zona contigua al portamáscaras para guiarlo de forma fija por la apertura de la placa superior.

Este sistema dispone de dos placas, una fija y otra móvil, las cuales están sujetas a la placa base superior mediante unos cilindros de acero inoxidable, por los cuales se les hace pasar un tornillo por su interior finalizando la sujeción.

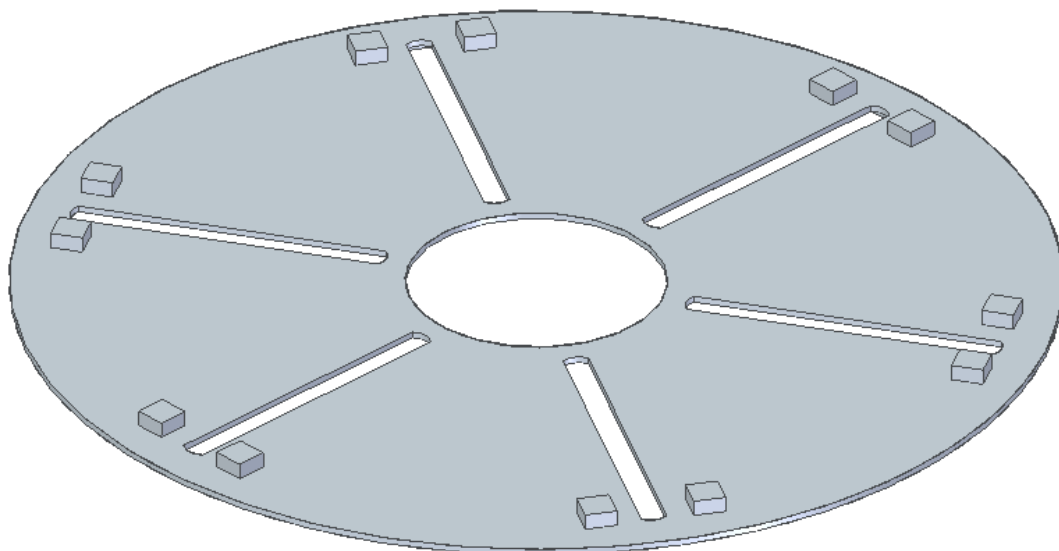


Figura 11.2.3.2 Placa móvil

Como enlace entre las dos placas se han colocado unos rodamientos de rodillo en unos raíles especialmente diseñados para este sistema.

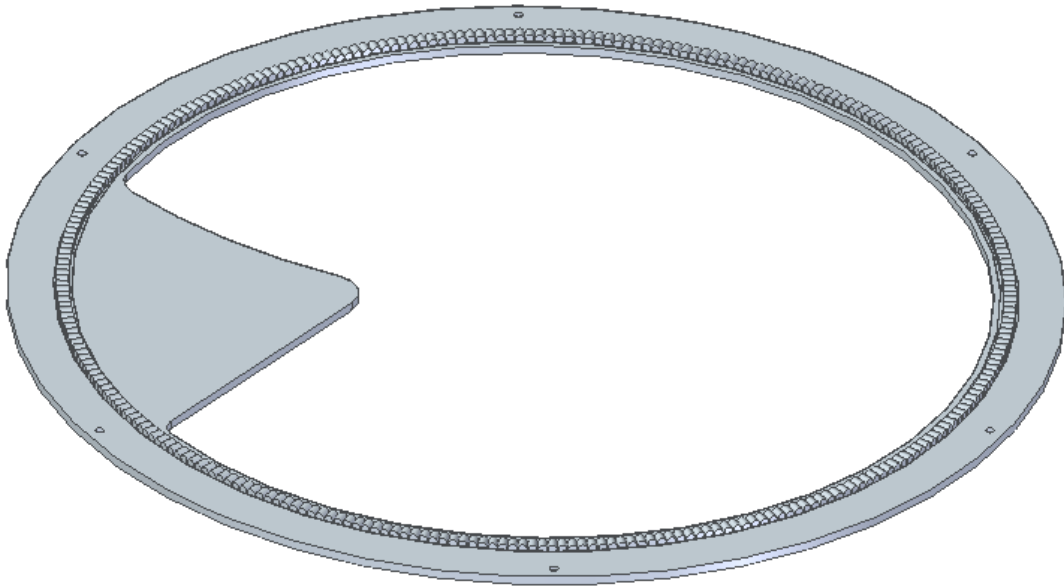


Figura 11.2.3.3 Placa fija con los rodamientos de rodillos

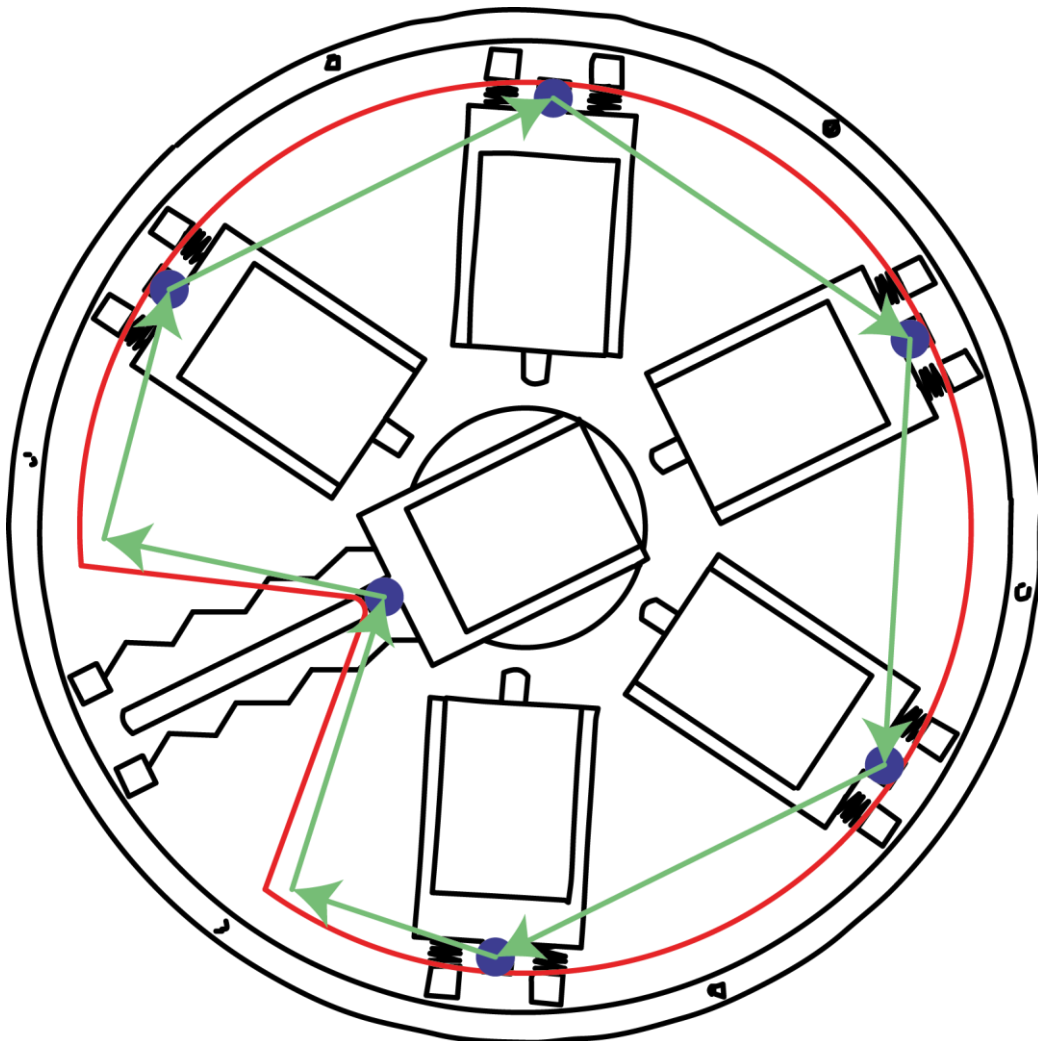


Figura 11.2.3.4 Mecanismo del sistema de máscaras

Los cilindros del portamáscaras se desplazan por la superficie de una curva que está diseñada para que con el giro de la placa móvil, las portamáscaras se posicionen de modo que solo una de ellas esté centrada mientras las demás están fijas. Dado que solo existe una fuerza hacia el interior, es necesario incluir unos muelles en el exterior que ejerzan la fuerza suficiente como para devolver el portamáscaras a su sitio.

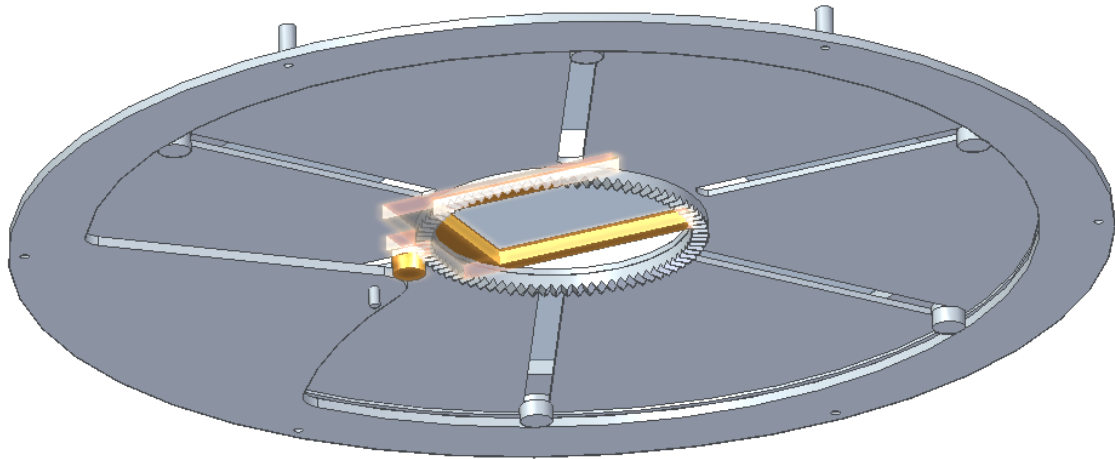


Figura 11.2.3.5 Movimiento del portamáscaras

Para producir el giro de esta parte móvil, se hace uso de una corredera circular, que se posiciona en el interior de esta placa y que, con el uso de un engranaje fijado a un eje, se consigue el giro de la parte móvil respecto a la placa fija.

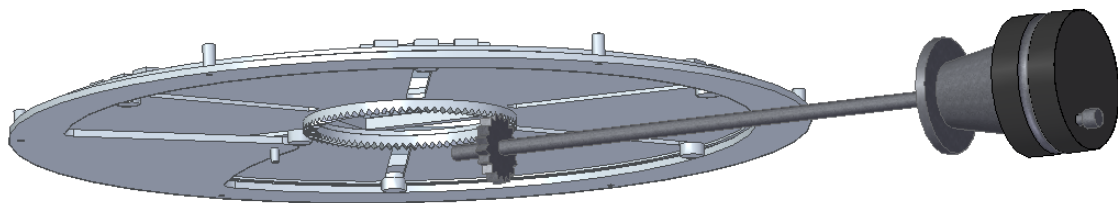


Figura 11.2.3.6 Mecanismo de engranajes

Para realizar este giro es necesaria una gran exactitud a causa de la poca superficie de la que dispone el cilindro del portasubstrato en el pico de la curva, debido a esta razón es necesaria la inserción de un servomotor. Gracias a este dispositivo, se puede controlar con exactitud el giro de la placa móvil, y por lo tanto, un buen posicionamiento del sustrato.

El portamáscaras dispone de una apertura en la que va encajada la máscara de sombra, y queda totalmente ajustada al sistema de forma automática.

11.2.4. Obturador rotatorio

- Objetivo

El objetivo de este elemento del sistema es crear diferentes espesores de capa en la deposición de los materiales en el sustrato. De esta forma se pueden obtener diferentes espesores en un mismo proceso de evaporación de metales.

● Diseño

En el diseño del obturador rotatorio, denominado así por su uso común en procesos de fabricación en dispositivos de óptica, trata en crear tres espesores distintos en un mismo proceso. Para ello, se pretende que mediante el giro continuo de una especie de hélice, se tape y se exponga el sustrato a la conexión directa con el gas en fase vapor.

La hélice diseñada, tal como se observa en la figura 11.2.4.1, pretende dividir el espesor de la película depositada en tres espesores distintos, en la primera una deposición completa, en la segunda tapando un tercio del material total en fase vapor, y en la última tapando dos tercios.

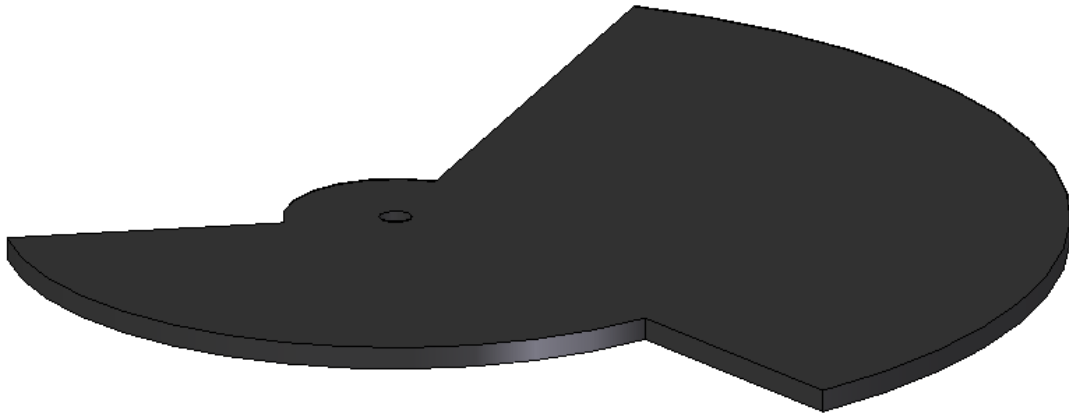


Figura 11.2.4.1 Obturador rotatorio

La partición en tres partes rectangulares exactas de espesor constante es imposible de realizar usando un obturador rotatorio, dado que el giro produce un círculo. De acuerdo al estudio realizado, las muestras más exactas se obtendrán dentro del área que produce el giro, ya que conforme no dirigimos a las esquinas de los rectángulos, dejamos de estar en la zona que se está evaporando el material para pasar a otro espesor de película delgada.

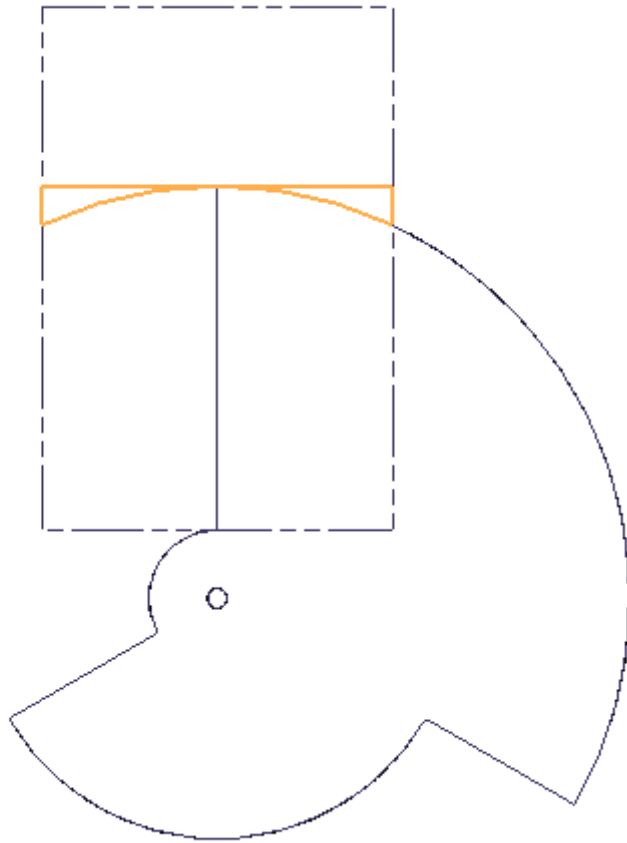


Figura 11.2.4.2 Referencia de la máscara respecto al obturador rotatorio

11.3. Conjunto de cámara de vacío y sistema de evaporación física

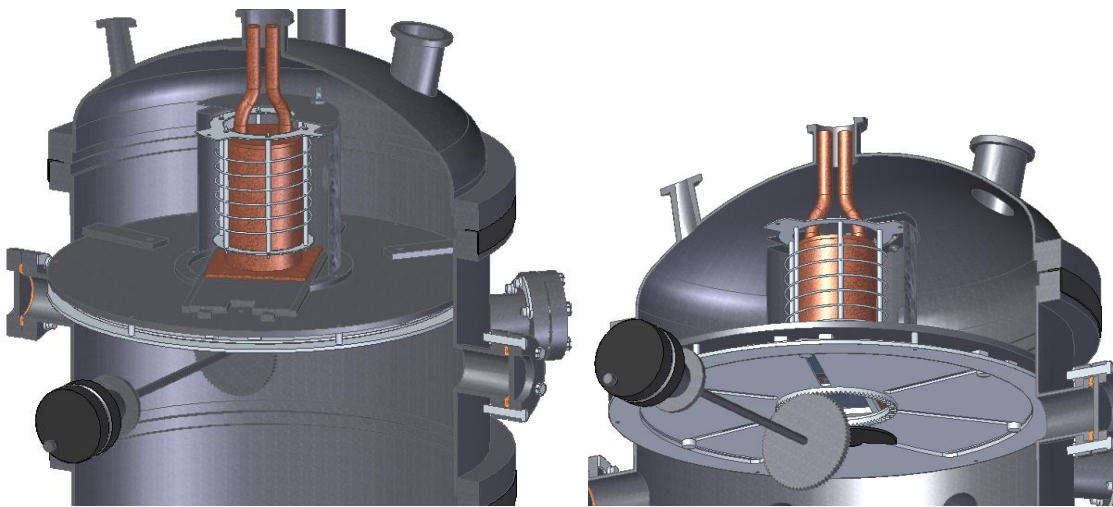


Figura 11.3.1 Visión de la zona alta adecuada a la cámara de vacío

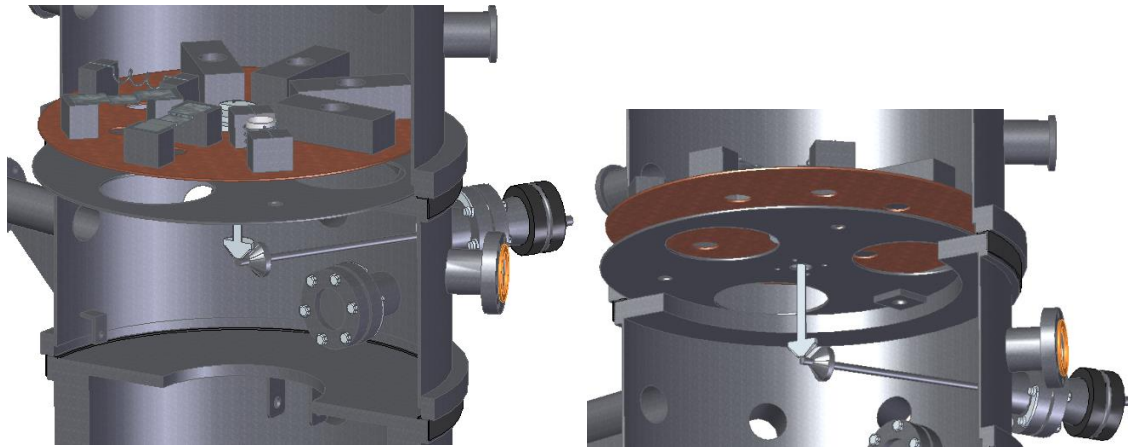


Figura 11.3.2 Visión de la zona baja adecuada a la cámara de vacío

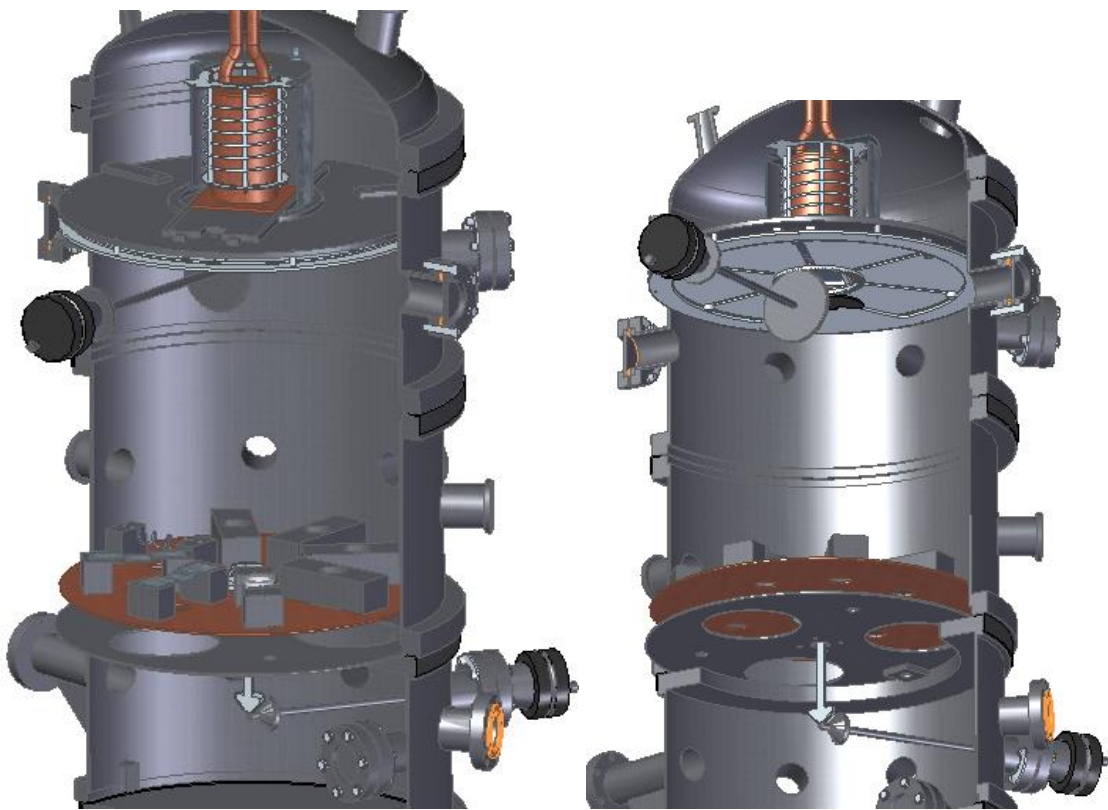


Figura 11.3.3 Visión general del sistema diseñado en la cámara de vacío

12. Conclusiones

Una vez realizado el trabajo expuesto en el presente documento, y teniendo una visión global del mismo, se puede observar que es posible realizar la coevaporación de materiales. Para ello, se ha diseñado un sistema con 8 fuentes de evaporación diferentes, las cuales son operables individualmente.

El diseño realizado ha tenido mucho trabajo en el programa 3D SolidEdge, ya que se han dimensionado las partes de la cámara, las cuales disponíamos en el laboratorio, para adecuar nuestro dispositivo proporcionándole una exactitud enorme.

El diseño realizado a tenido muchas limitaciones debido a los materiales utilizables en sistemas de vacío, ya que los dispositivos que se diseñan para el interior deben poseer unas características especiales.

Se ha podido recuperar la cámara haciéndola operativa gracias a una limpieza a fondo de cada parte, y a una búsqueda de fugas que ha implicado mucho tiempo. Una vez revisados todos los dispositivos se demostró que la cámara disponía de elementos muy sucios debidos a la mala utilización de los mismos.

Se ha conseguido mediante una visión común de todos los dispositivos del sistema diseñado, poder adecuarlos de forma concisa para lograr su funcionamiento adecuado.

A nivel personal, la realización del presente trabajo me ha supuesto un reto que valoro muy positivamente, gracias al cual he aprendido el funcionamiento de los sistemas de vacío, de los cuales no había tenido ninguna docencia hasta el inicio de este trabajo, y he experimentado en primera persona cómo muchos conceptos técnicos adquiridos en las aulas son aplicables a la realización técnica de diferentes dispositivos.

En resumen, el presente trabajo representa un proyecto real que se puede llevar a cabo mediante la fabricación de los elementos mencionados. A nivel personal me ha servido para tener una toma de contacto con el mundo de sistemas de vacío, así como con la mayoría de los dispositivos que se suelen utilizar.

BIBLIOGRAFÍA

Kurt J. Lesker. (2009). 9th Global Vacuum Product Guide.

LEYBOLD S.A. (s.f.). Vacuum Vademecum. Barcelona.

O'Hanlon, J. F. (2003). *A User's Guide to Vacuum Technology*. Hoboken: Wiley-Interscience.

Peris, J. A. (1984). *Curso de termodinámica*. Madrid: Alhambra, S.A.

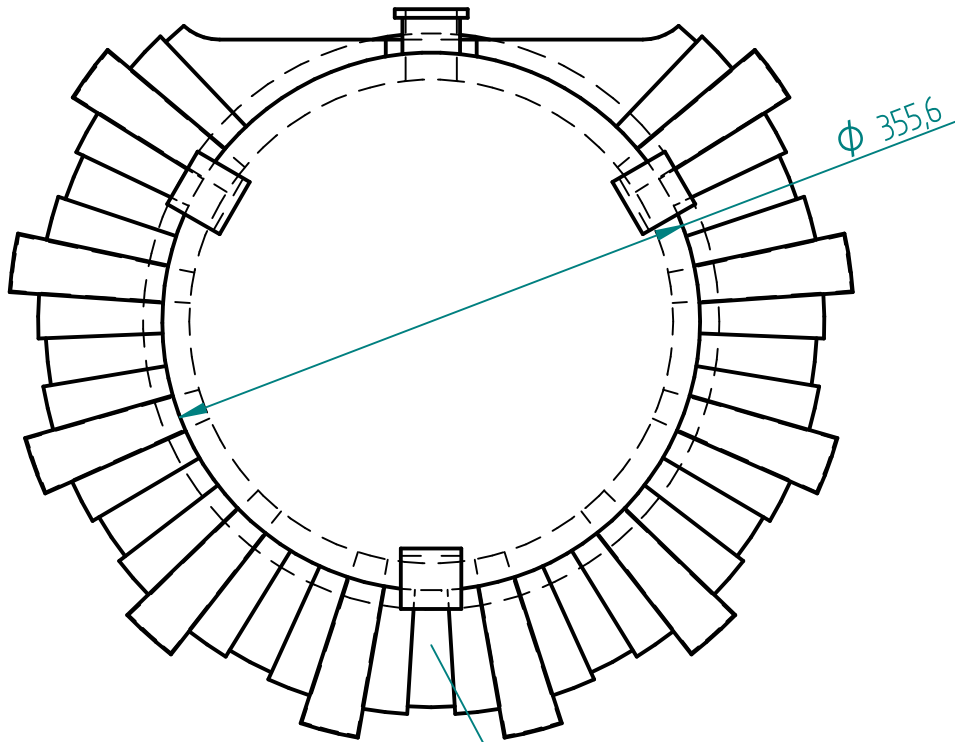
Rosevury, F. (1993). *Handbook of electron and vacuum techniques*. Nueva York: American Institute of Physics.

Roth, A. (1990). *Vacuum Technology*. Amsterdam: Elsevier Science B.V.

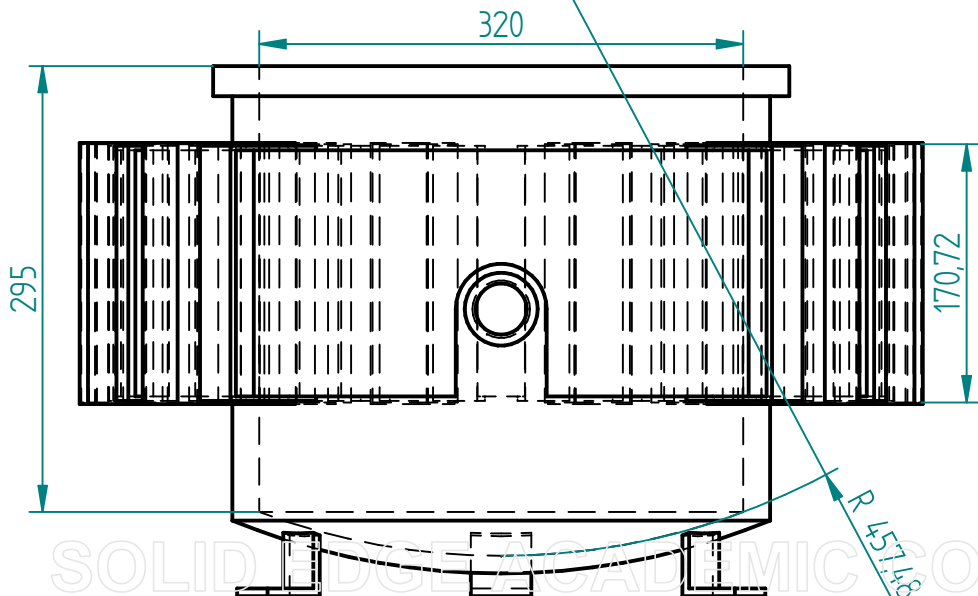
Thermionics Laboratory, Inc. (2001). *Vacuum components and systems*. Hayward: Thermionics vacuum products.

ANEXO I

Los planos de las piezas relevantes de la cámara y de los dispositivos empleados en el diseño planteado se observan en las siguientes páginas.



ϕ 355,6



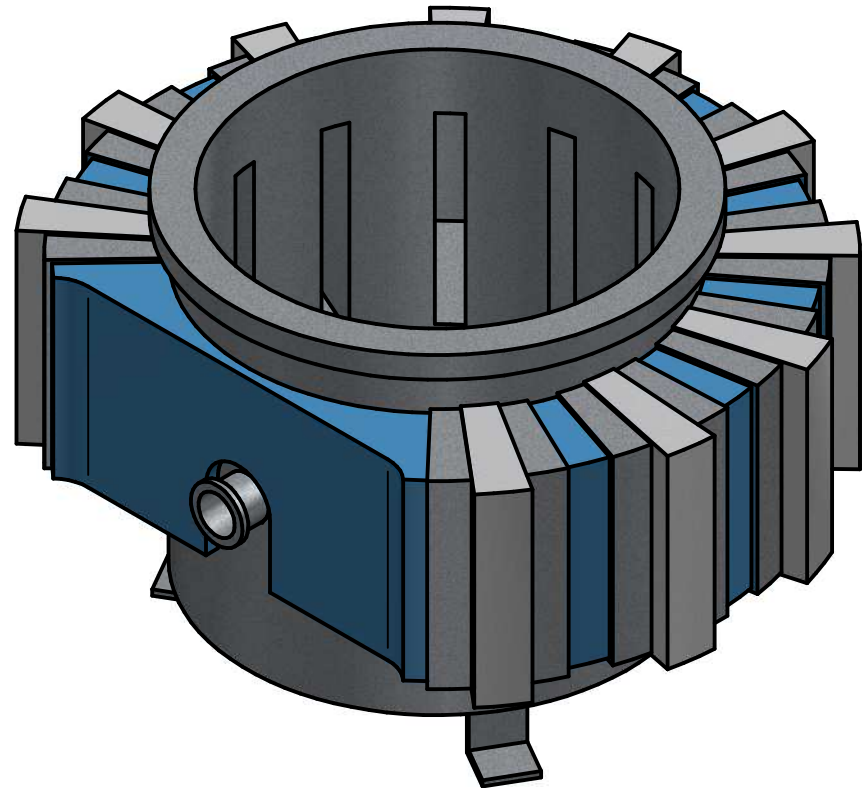
320

295

170,72

R 45,718

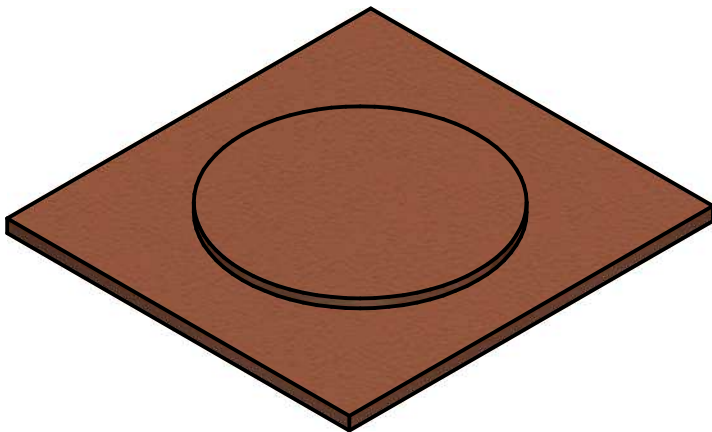
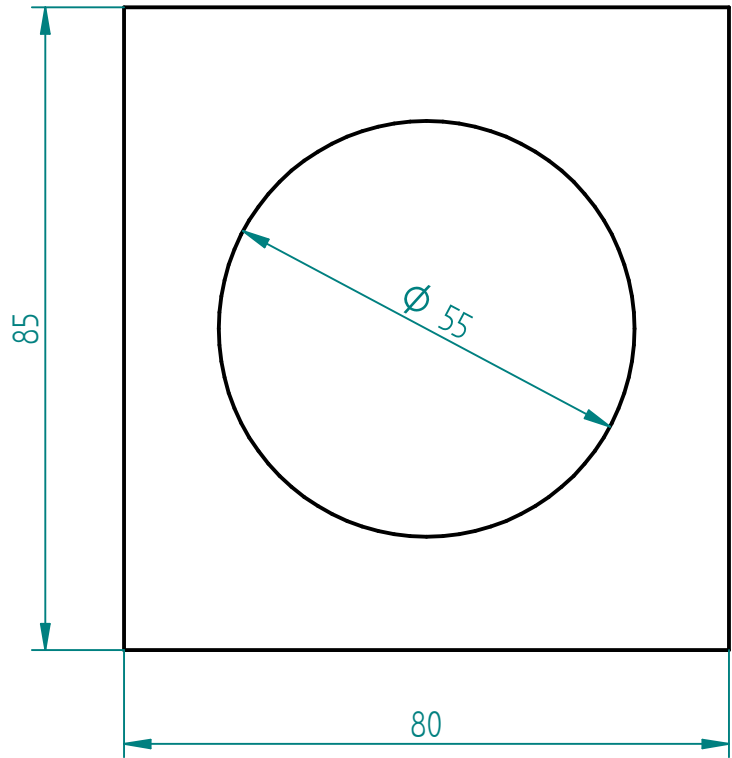
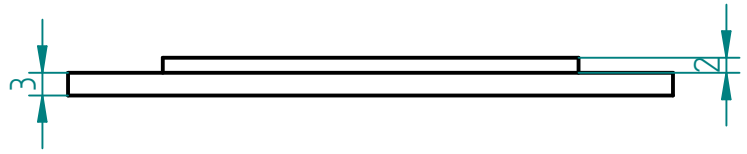
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



Nombre		Fecha		Solid Edge ST Siemens PLM Software				
Dibujado	Aitor Arano							
Comprobado				Título				
Aprobado 1				Bomba de iones				
Aprobado 2								
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$				A4	Plano	Rev		
				Archivo: Bomba_iones.dft				
				Escala	Peso	Hoja 1 de 1		

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

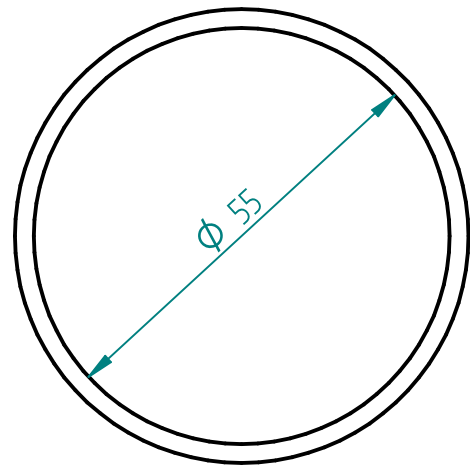
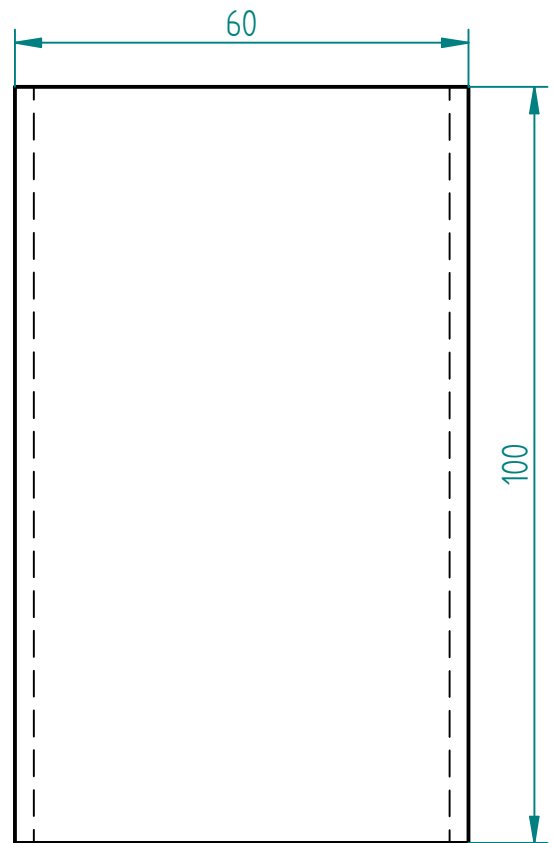
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software		
Dibujado	Aitor Arano			
Comprobado		Título Bote base		
Aprobado 1				
Aprobado 2		A4	Plano	Rev
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$		Archivo: Bote_base.dft		
		Escala	Peso	Hoja 1 de 1

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

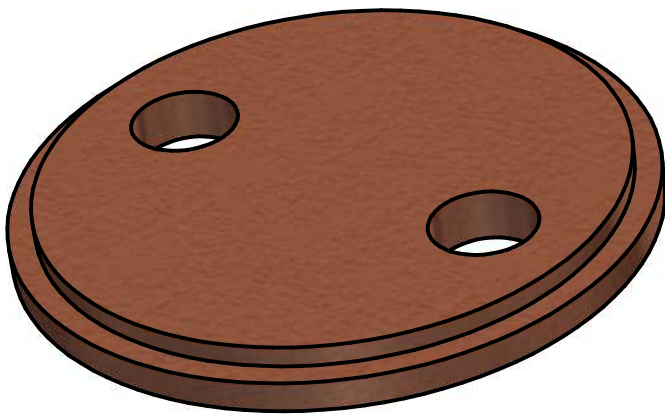
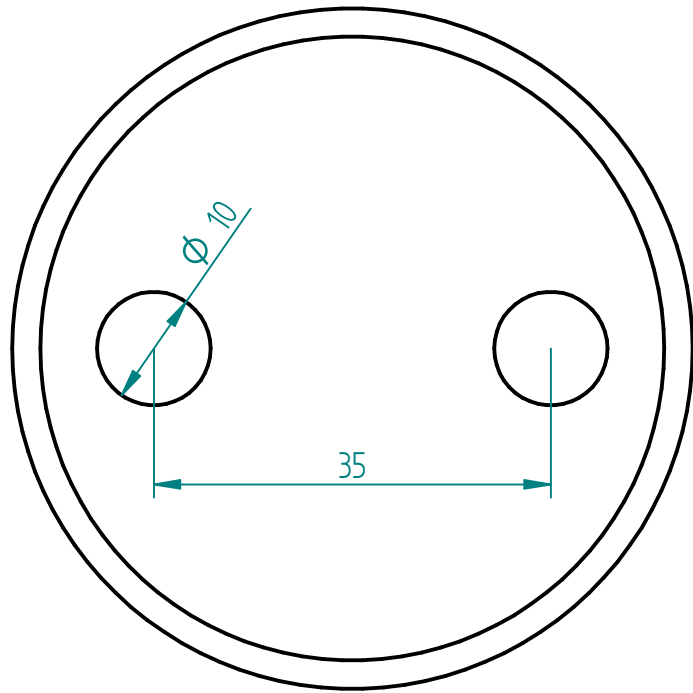
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software	
Dibujado	Aitor Arano		
Comprobado		Título	
Aprobado 1		Bote cuerpo	
Aprobado 2		A4	Plano
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$		Rev	
		Archivo: Bote_cuerpo.dft	
Escala		Peso	Hoja 1 de 1

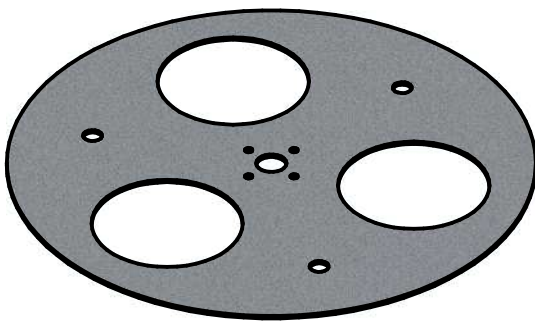
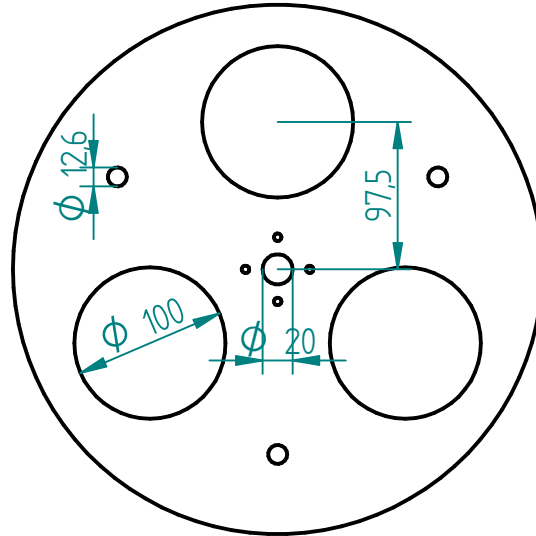
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



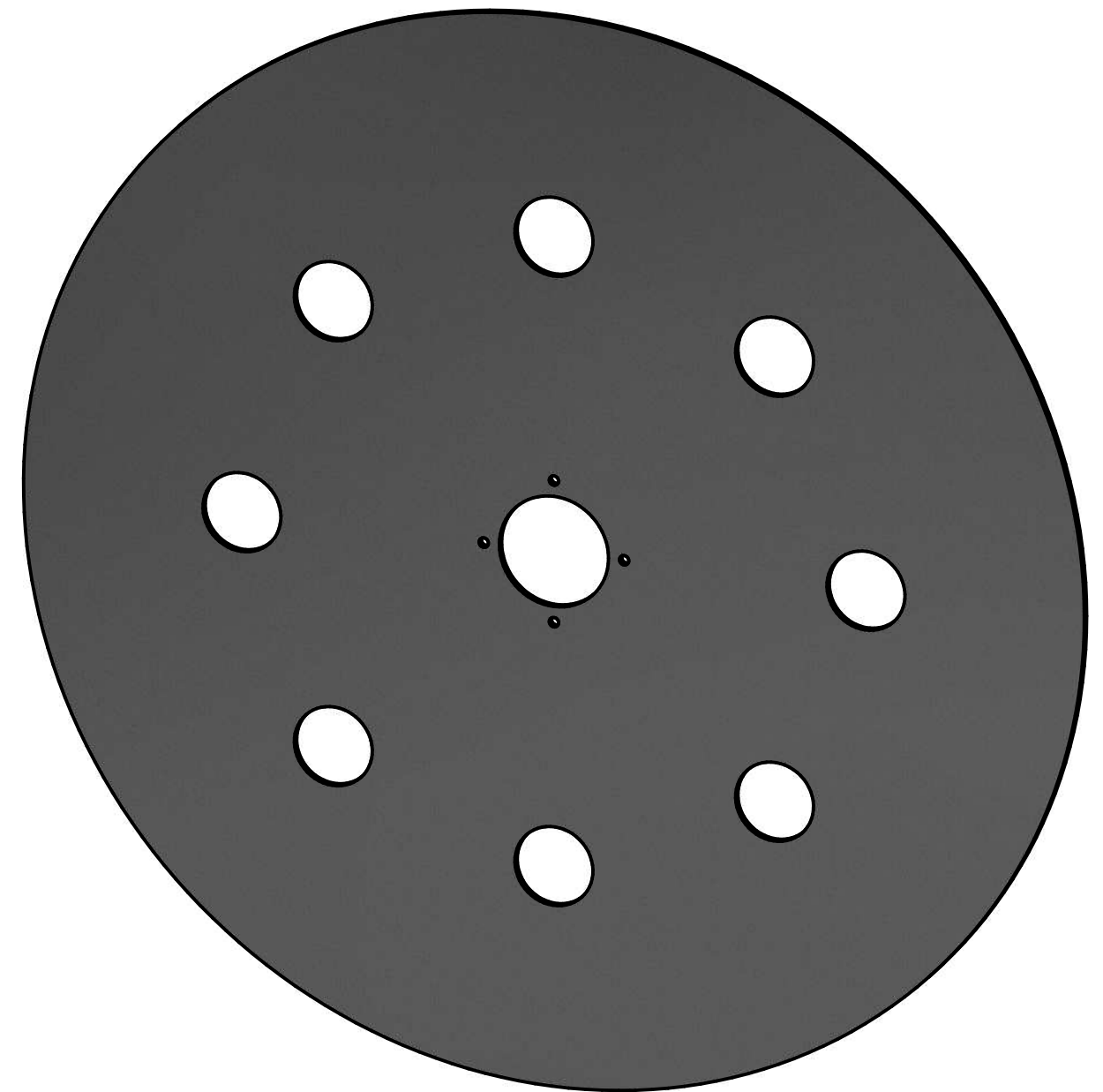
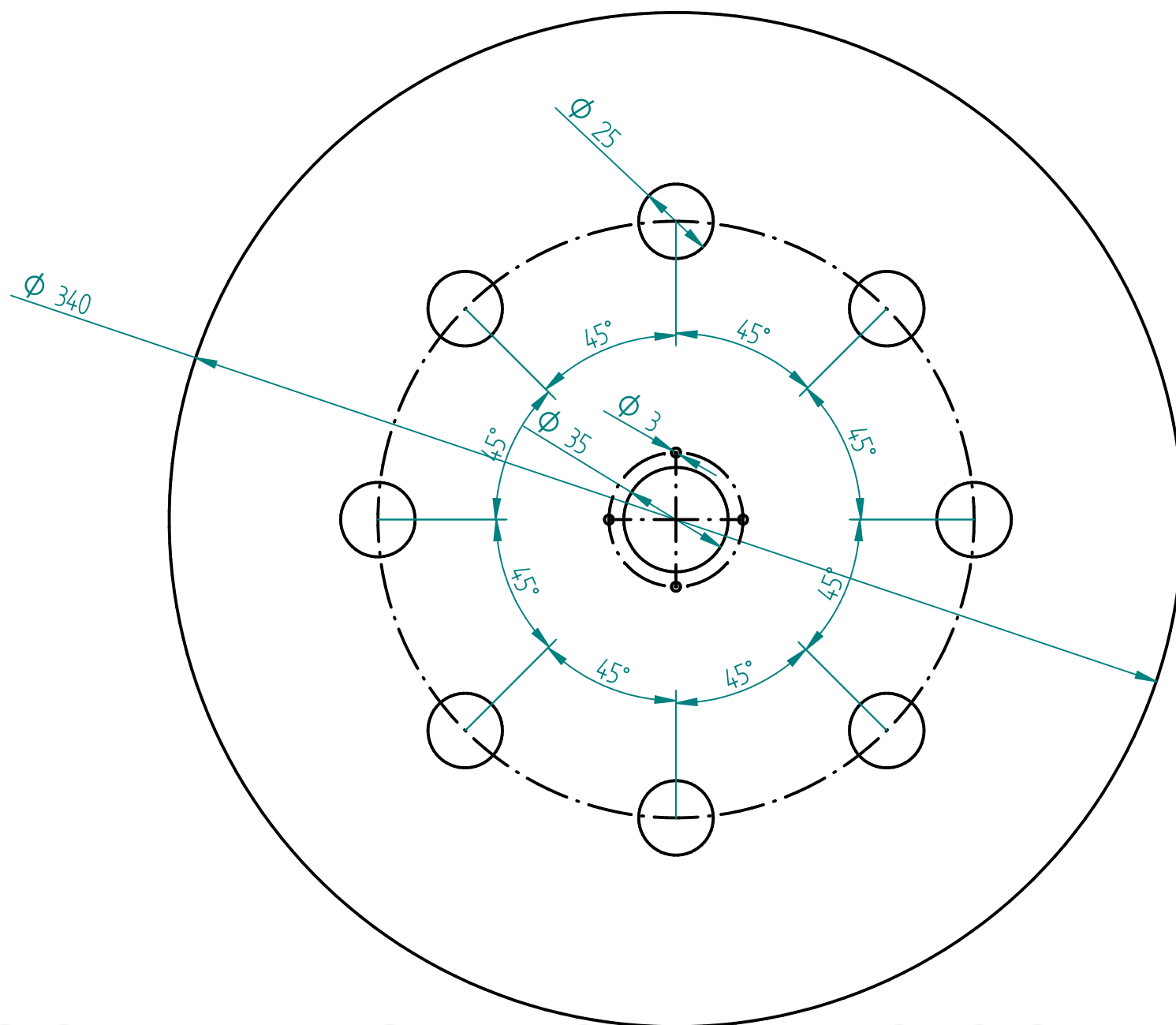
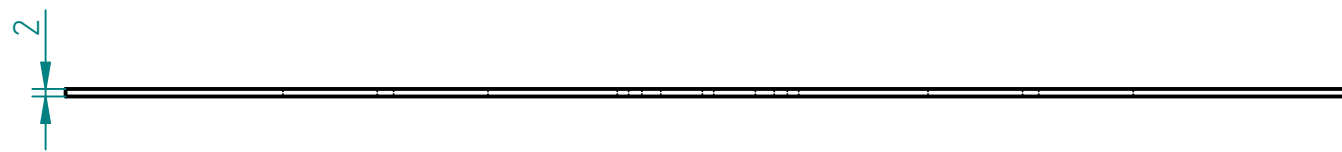
Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software		
Dibujado	Aitor Arano			
Comprobado		Título Bote tapa		
Aprobado 1				
Aprobado 2		A4	Plano	Rev
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$		Archivo: Bote_tapa.dft		
		Escala	Peso	Hoja 1 de 1

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software		
Dibujado	Aitor Arano			
Comprobado		Título Carrusel fijo		
Aprobado 1				
Aprobado 2		A4	Plano	Rev
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$		Archivo: Carrusel_fijo(B).dft		
		Escala	Peso	Hoja 1 de 1

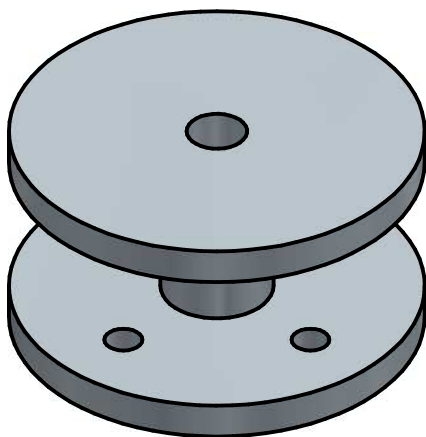
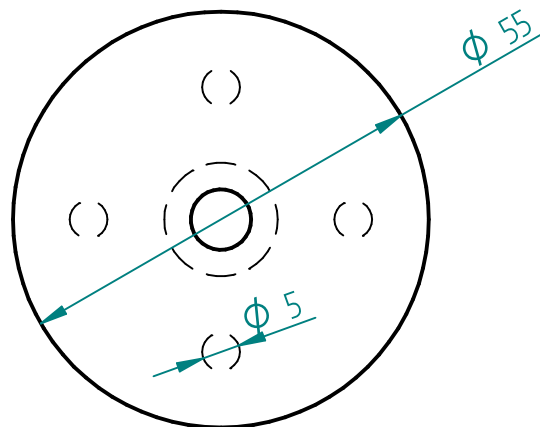
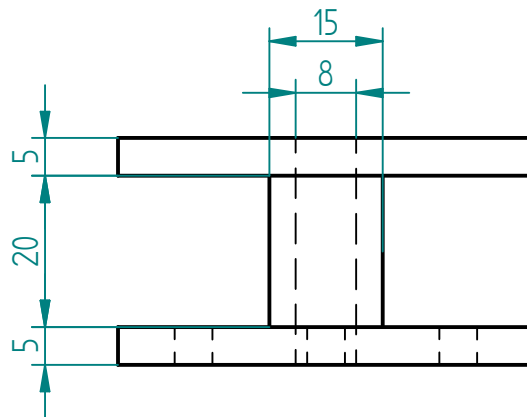
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software	
Dibujado: Aitor		Título: Carrusel_movil	
Comprobado		A3	Plano
Aprobado 1		Archivo: Carrusel_movil.dft	
Aprobado 2		Escala	Peso
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$		Hoja 1 de 1	

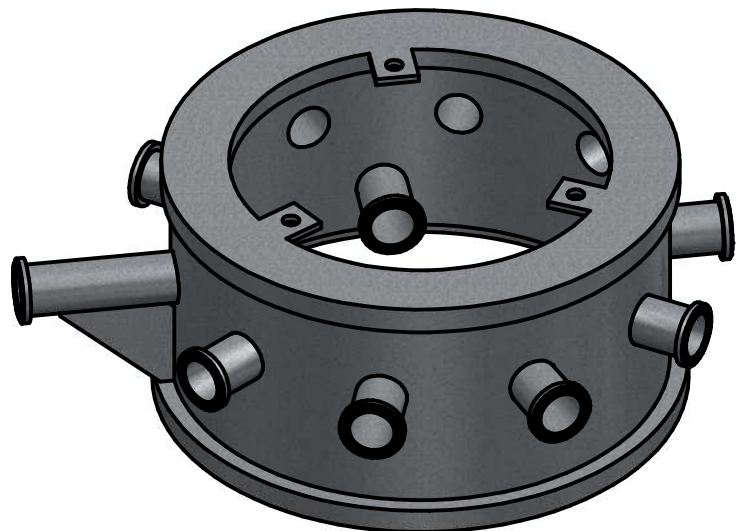
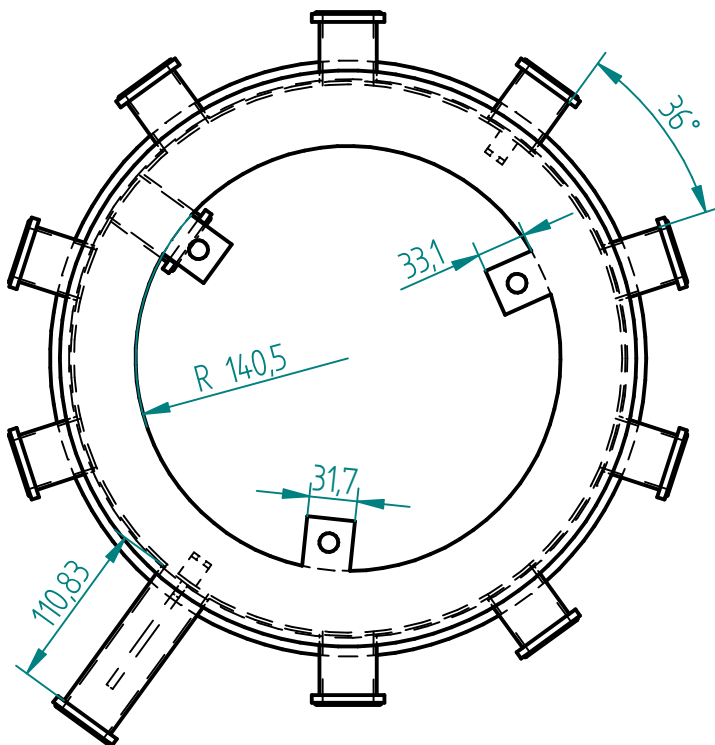
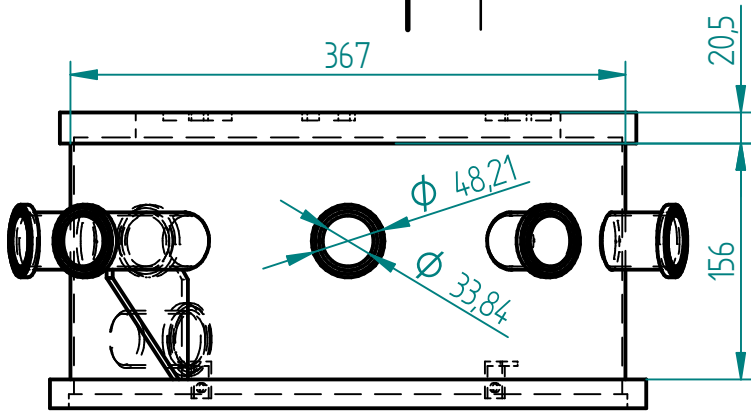
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software	
Dibujado	Aitor Arano		
Comprobado		Título	
Aprobado 1		Casquillo	
Aprobado 2		A4	Plano
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$		Archivo: Casquillo.dft	
		Escala	Peso
		Hoja 1 de 1	

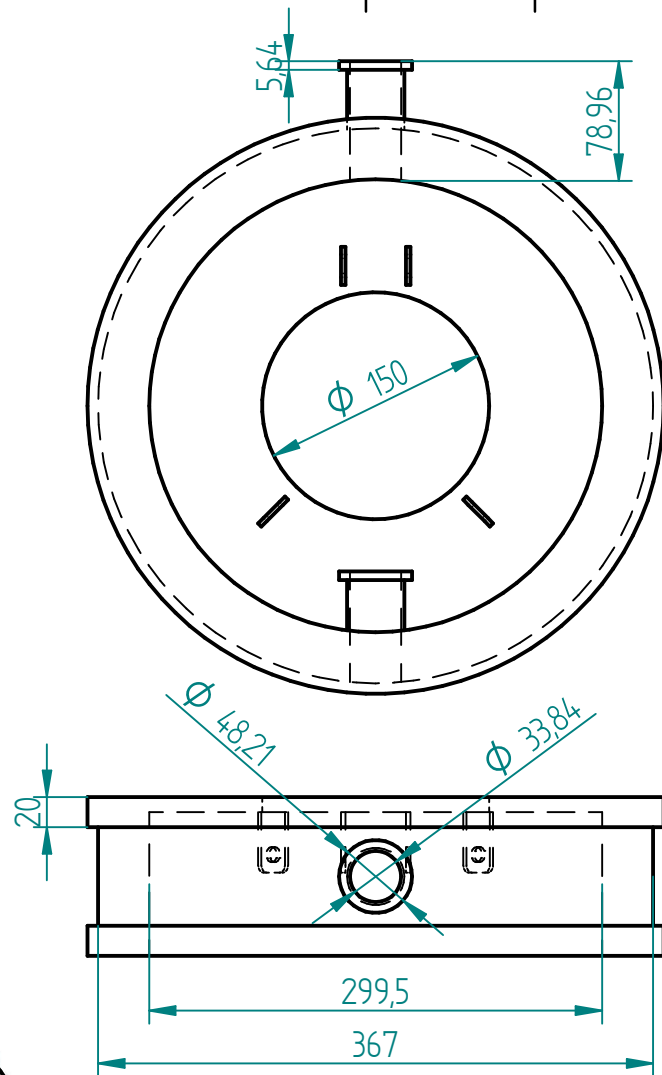
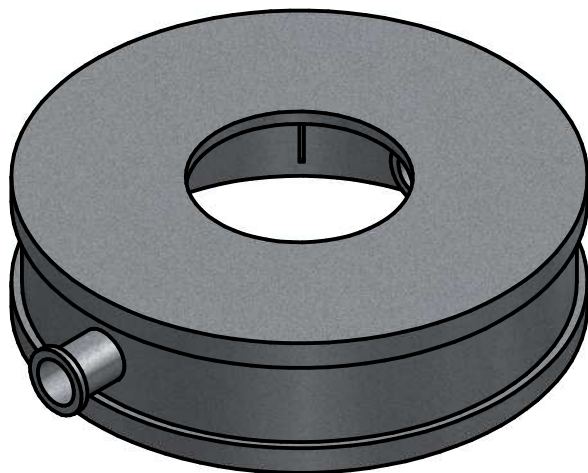
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



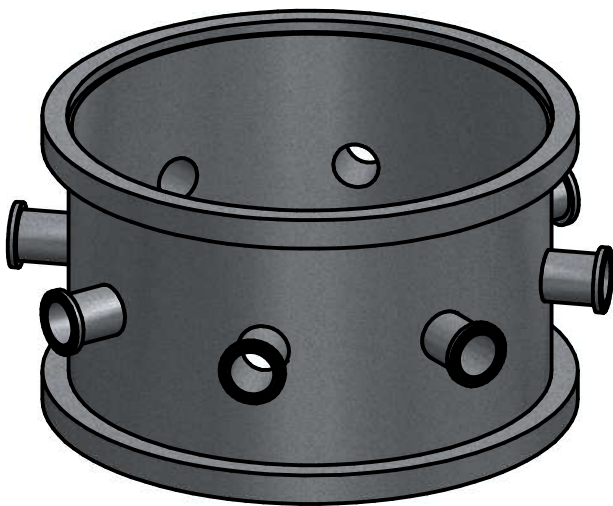
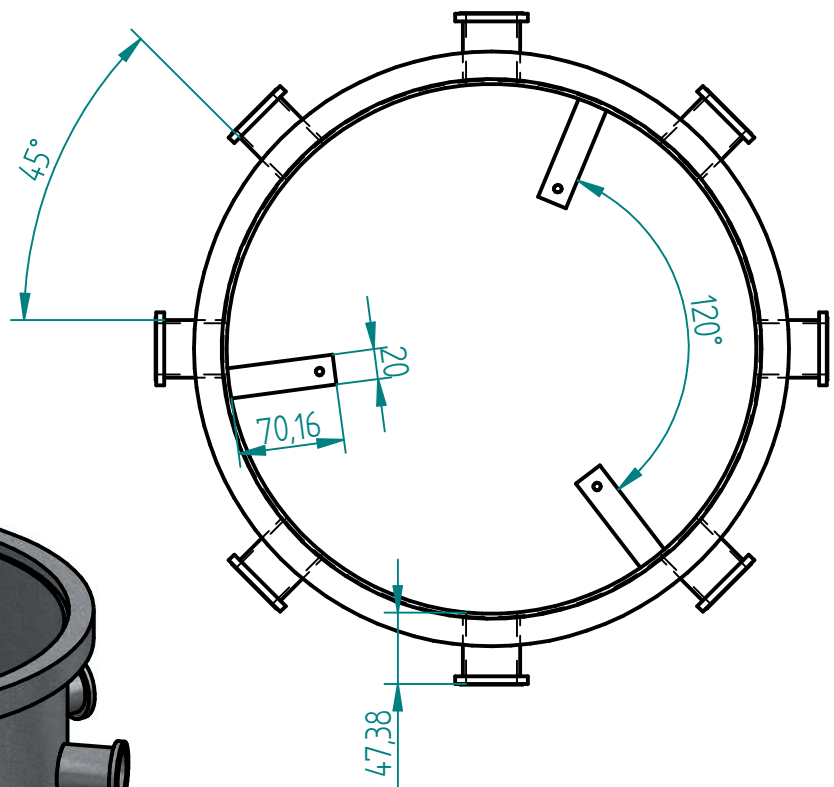
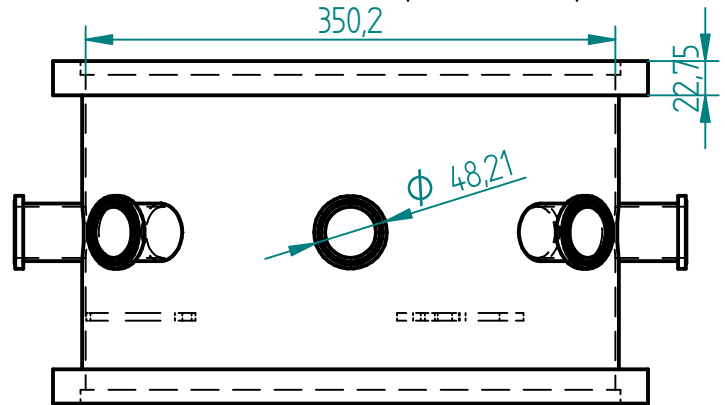
Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software	
Dibujado	Aitor Arano		
Comprobado		Título	
Aprobado 1		Collar 10	
Aprobado 2		A4	Plano
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$		Rev	
		Archivo: Collar(10)2.dft	
Escala		Peso	Hoja 1 de 1

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



	Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software		
Dibujado	Aitor Arano				
Comprobado			Título Collar 2		
Aprobado 1					
Aprobado 2			A4	Plano	Rev
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$			Archivo: Collar(2).dft		
			Escala	Peso	Hoja 1 de 1

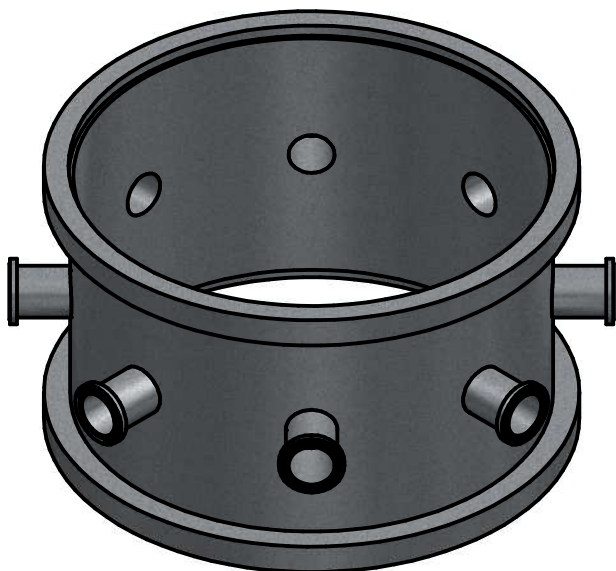
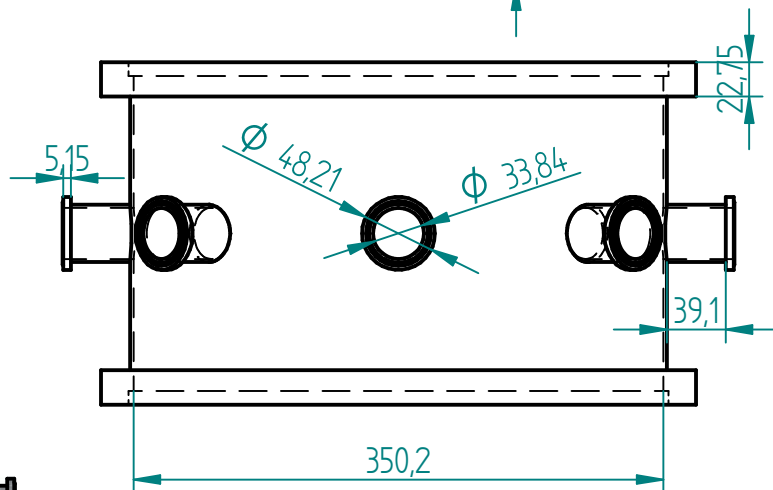
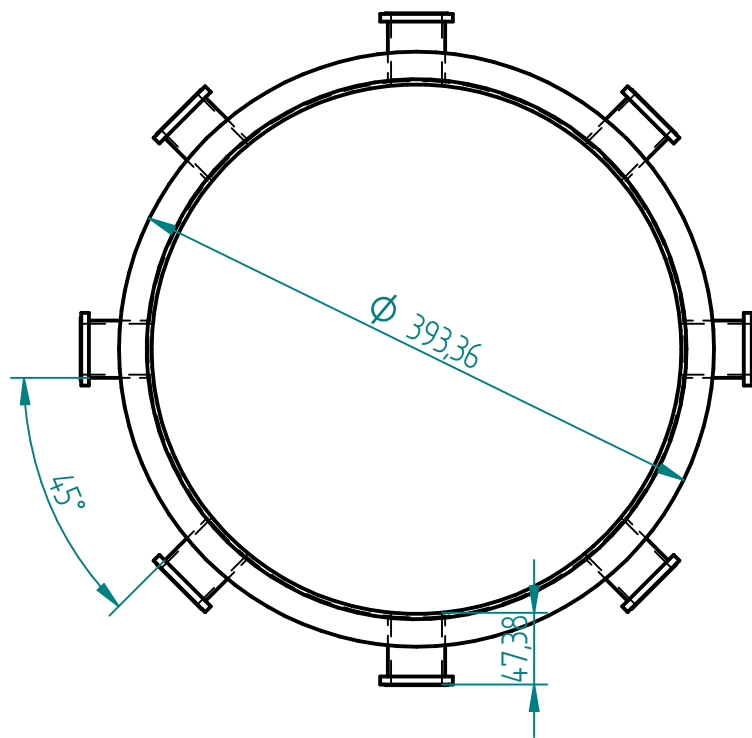
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software	
Dibujado	Aitor Arano		
Comprobado		Título	
Aprobado 1		Collar 8_2	
Aprobado 2		A4	Plano
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$		Archivo: Collar(8).dft	
		Escala	Peso
		Hoja 1 de 1	

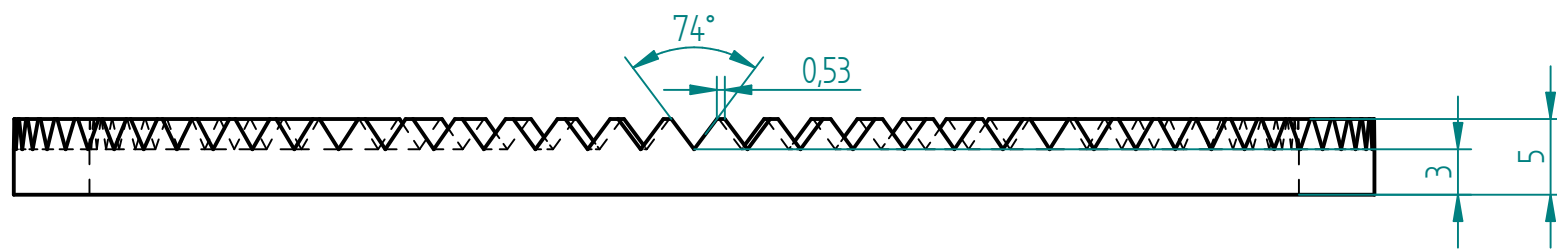
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

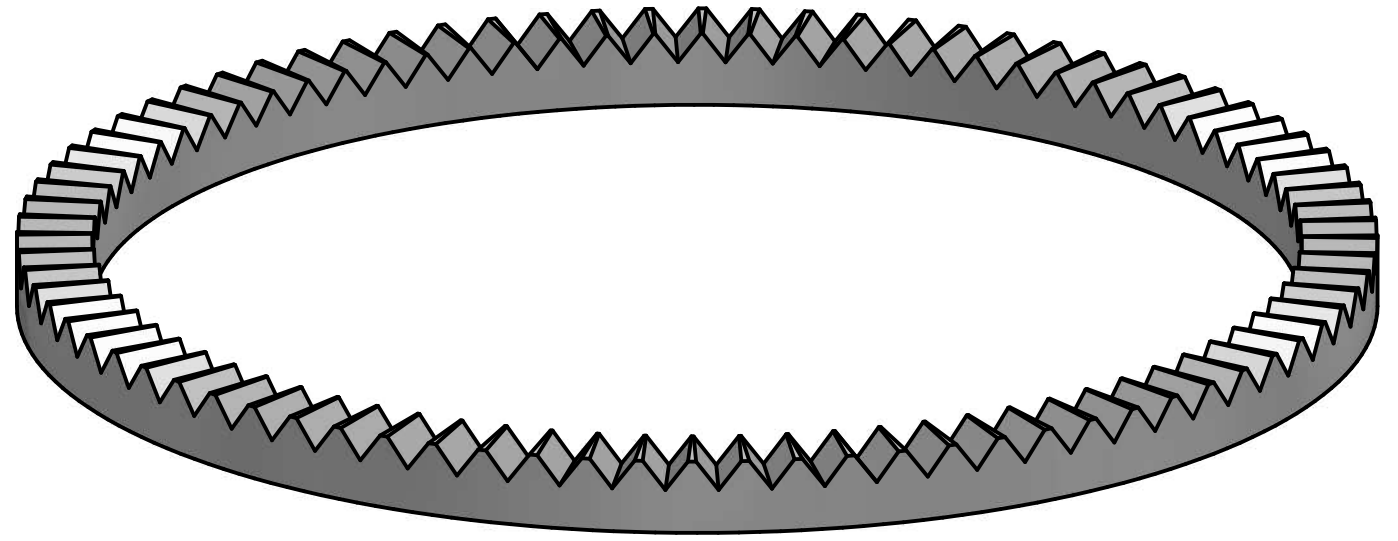
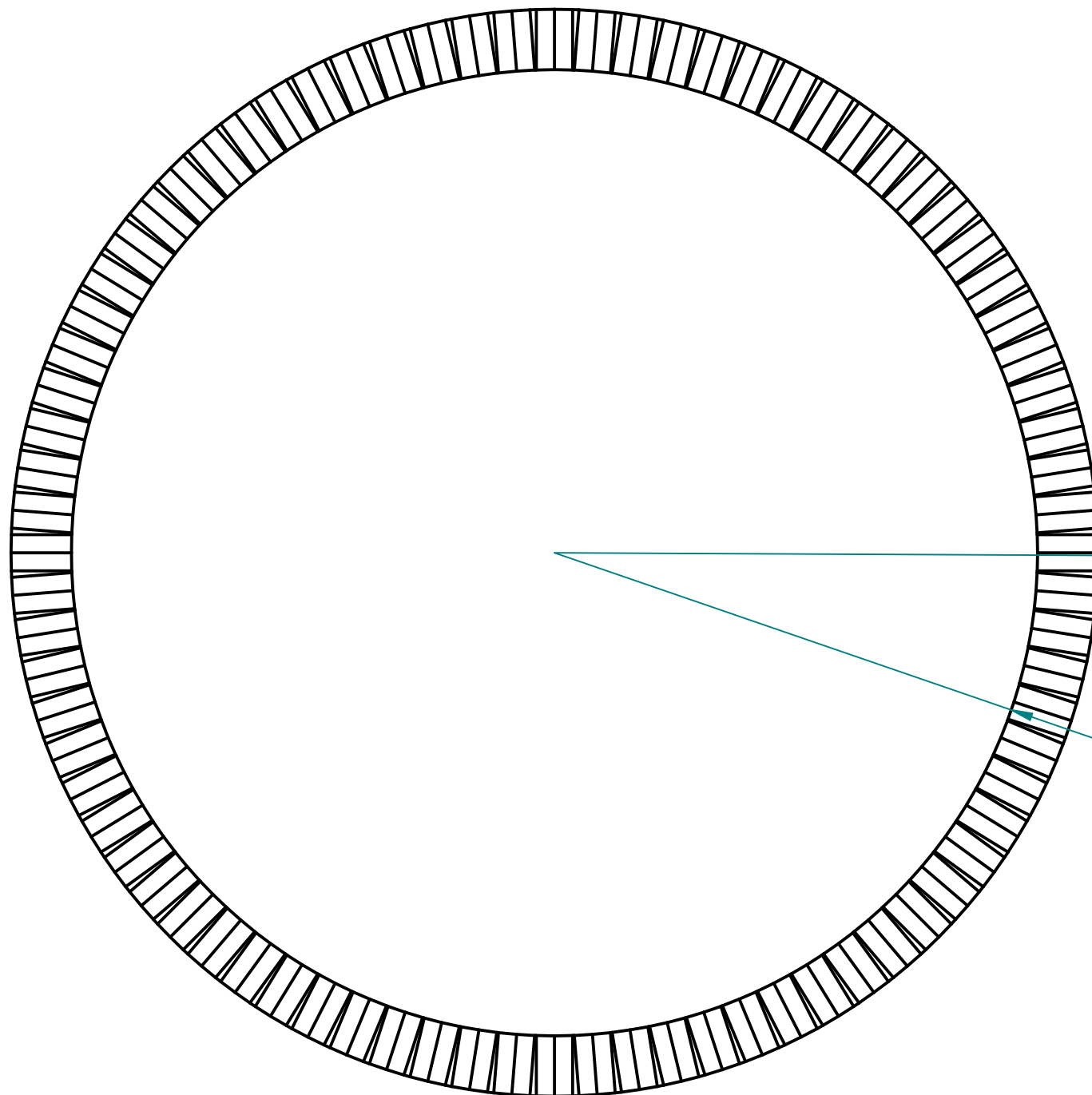


Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software		
Dibujado	Aitor Arano			
Comprobado		Título Collar 8		
Aprobado 1				
Aprobado 2		A4	Plano	Rev
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°		Archivo: Collar(8)sin.dft		
		Escala	Peso	Hoja 1 de 1

SOLID EDGE ACADEMIC COPY



Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



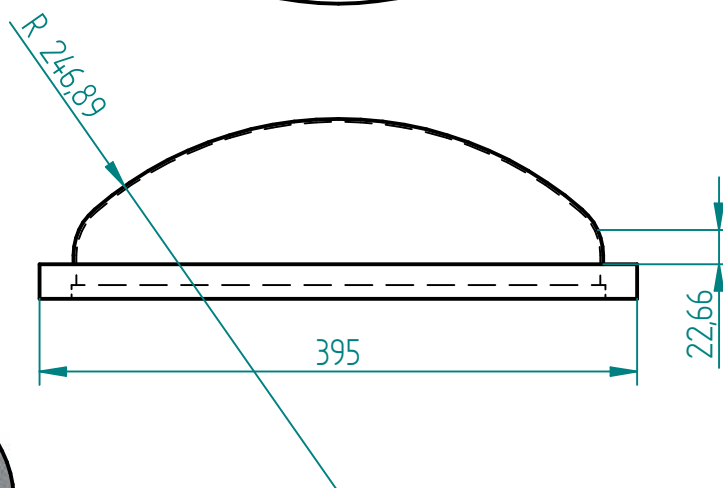
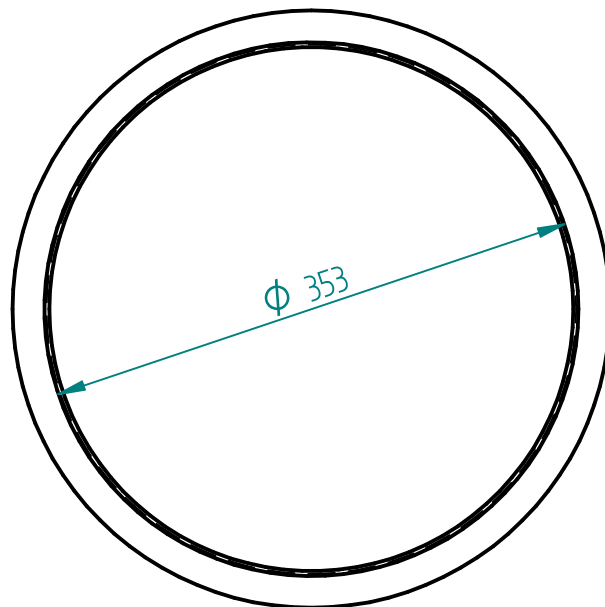
R 45

R 40

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

	Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software		
Dibujado	Aitor				
Comprobado			Título Corredera		
Aprobado 1					
Aprobado 2			A3	Plano	Rev
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°			Archivo: Corredera.dft		
			Escala	Peso	Hoja 1 de 1

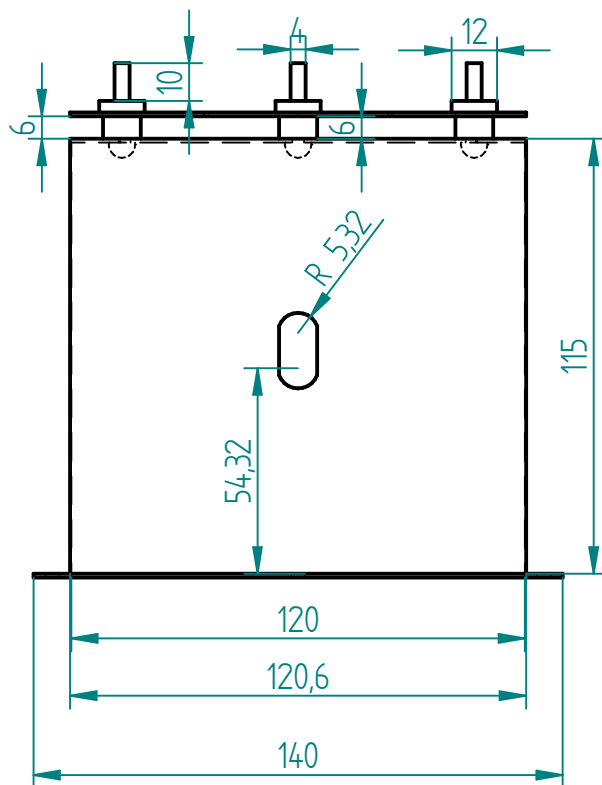
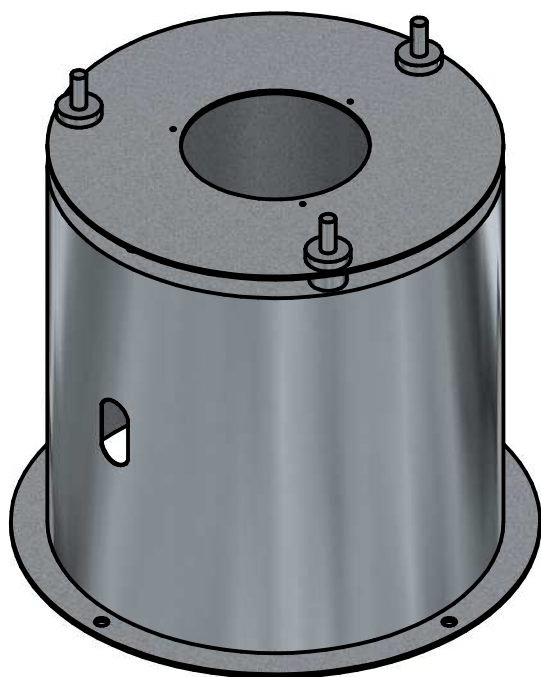
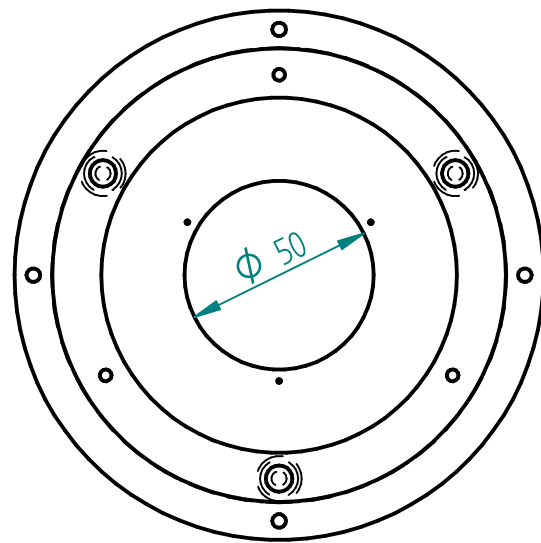
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



	Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software		
Dibujado	Aitor Arano				
Comprobado			Título		
Aprobado 1			Cubierta		
Aprobado 2			A4	Plano	Rev
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$			Archivo: Cubierta.dft		
			Escala	Peso	Hoja 1 de 1

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

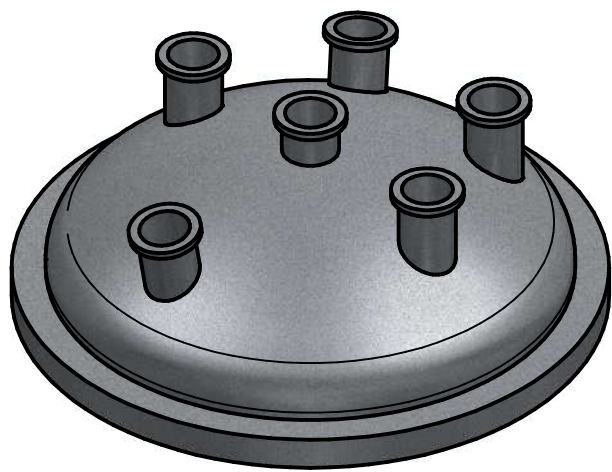
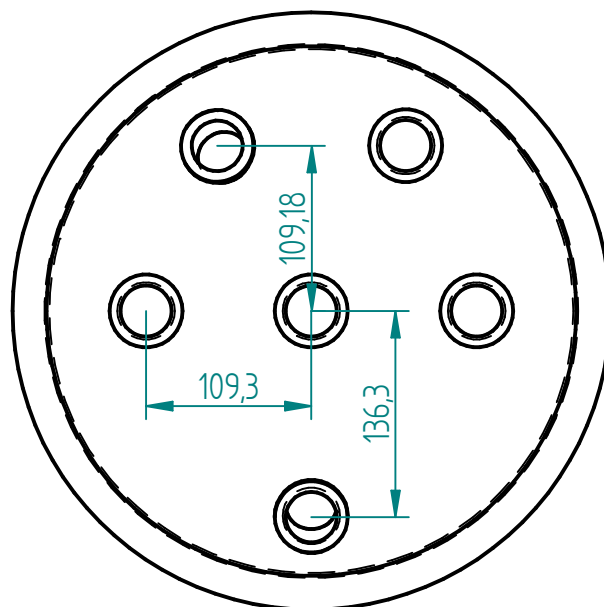
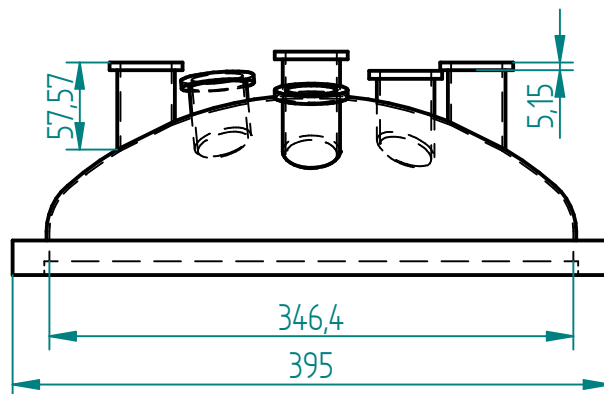
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software		
Dibujado	Aitor Arano			
Comprobado		Título Cubierta calentador		
Aprobado 1				
Aprobado 2		A4	Plano	Rev
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$		Archivo: Cubierta_calentador.dft		
		Escala	Peso	Hoja 1 de 1

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

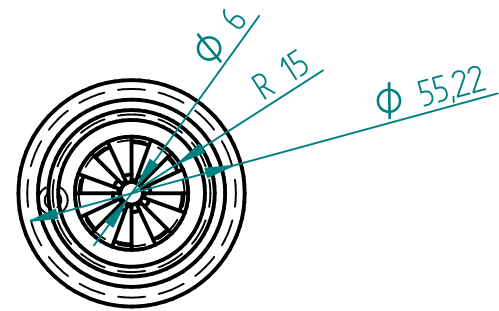
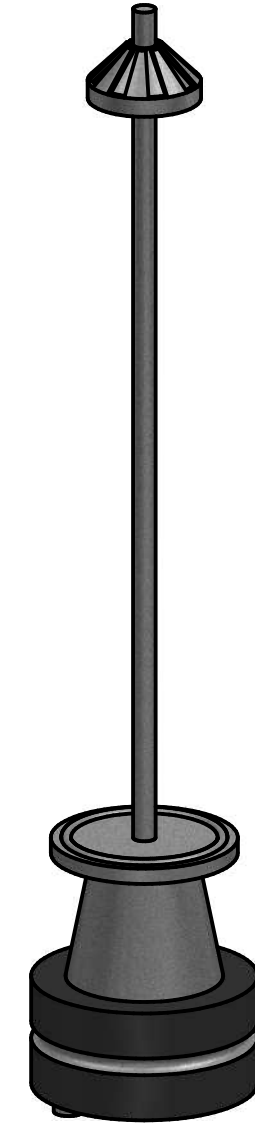
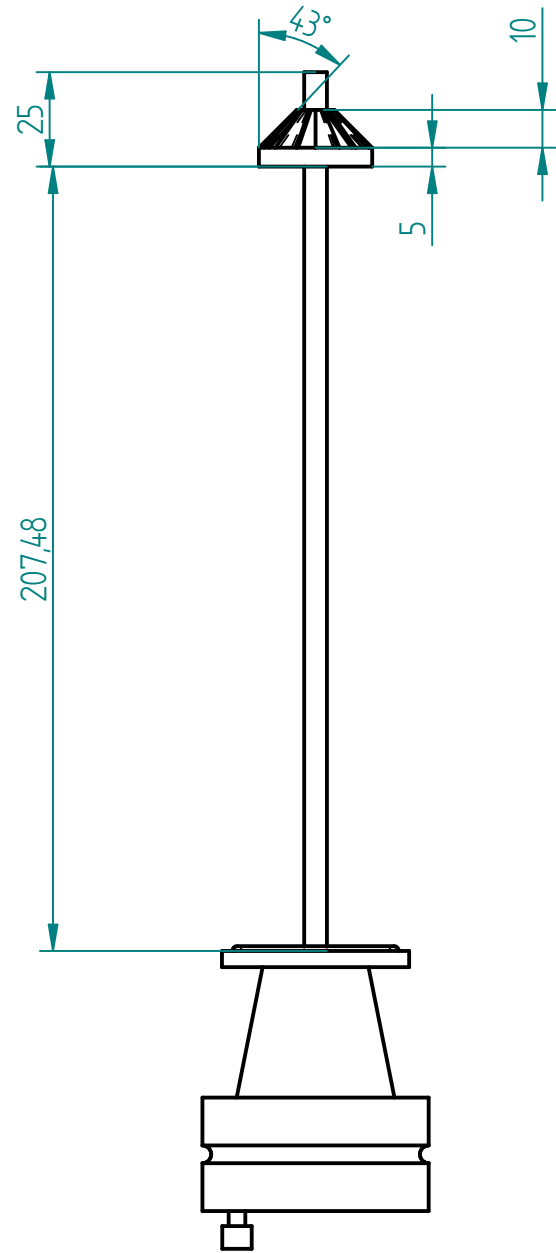
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software		
Dibujado	Aitor Arano			
Comprobado		Título CUBIERTA 6		
Aprobado 1				
Aprobado 2		A4	Plano	Rev
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°		Archivo: Cubierta6.dft		
		Escala	Peso	Hoja 1 de 1

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

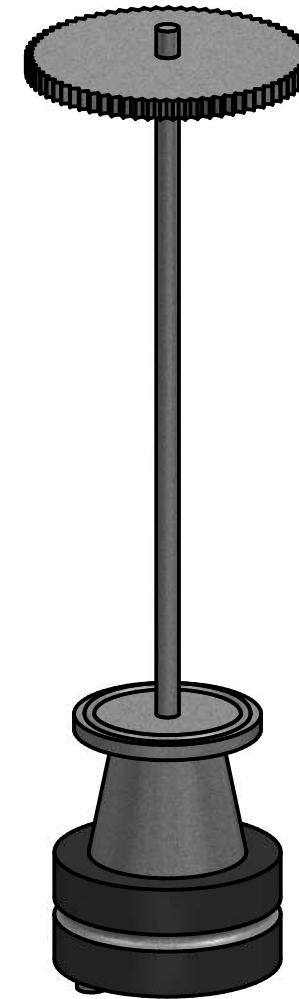
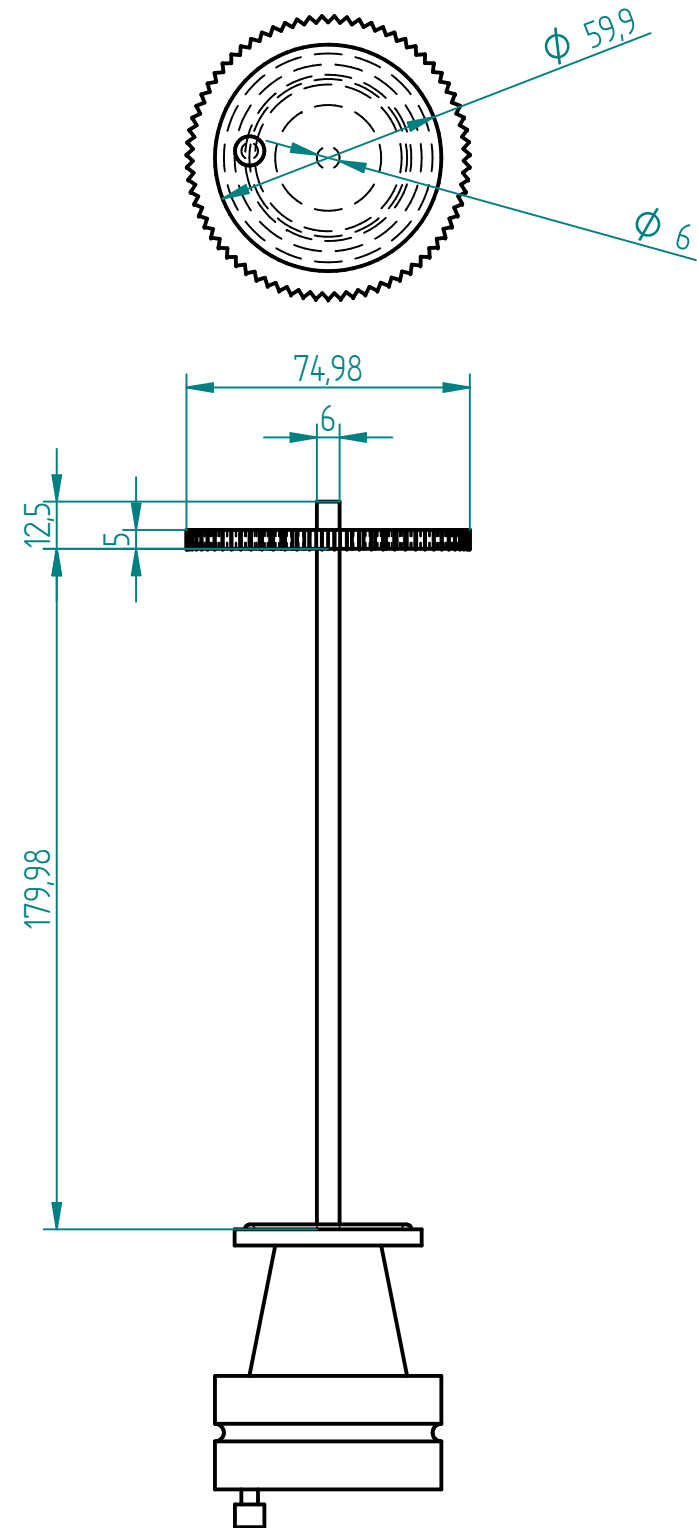
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



Nombre	Fecha	Solid Edge ST	
Dibujado	Aitor	Siemens PLM Software	
Comprobado		Título	
Aprobado 1		Eje_tapa	
Aprobado 2		A3 Plano	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°		Rev	
		Archivo: Eje_tapa.dft	
Escala		Peso	Hoja 1 de 1

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

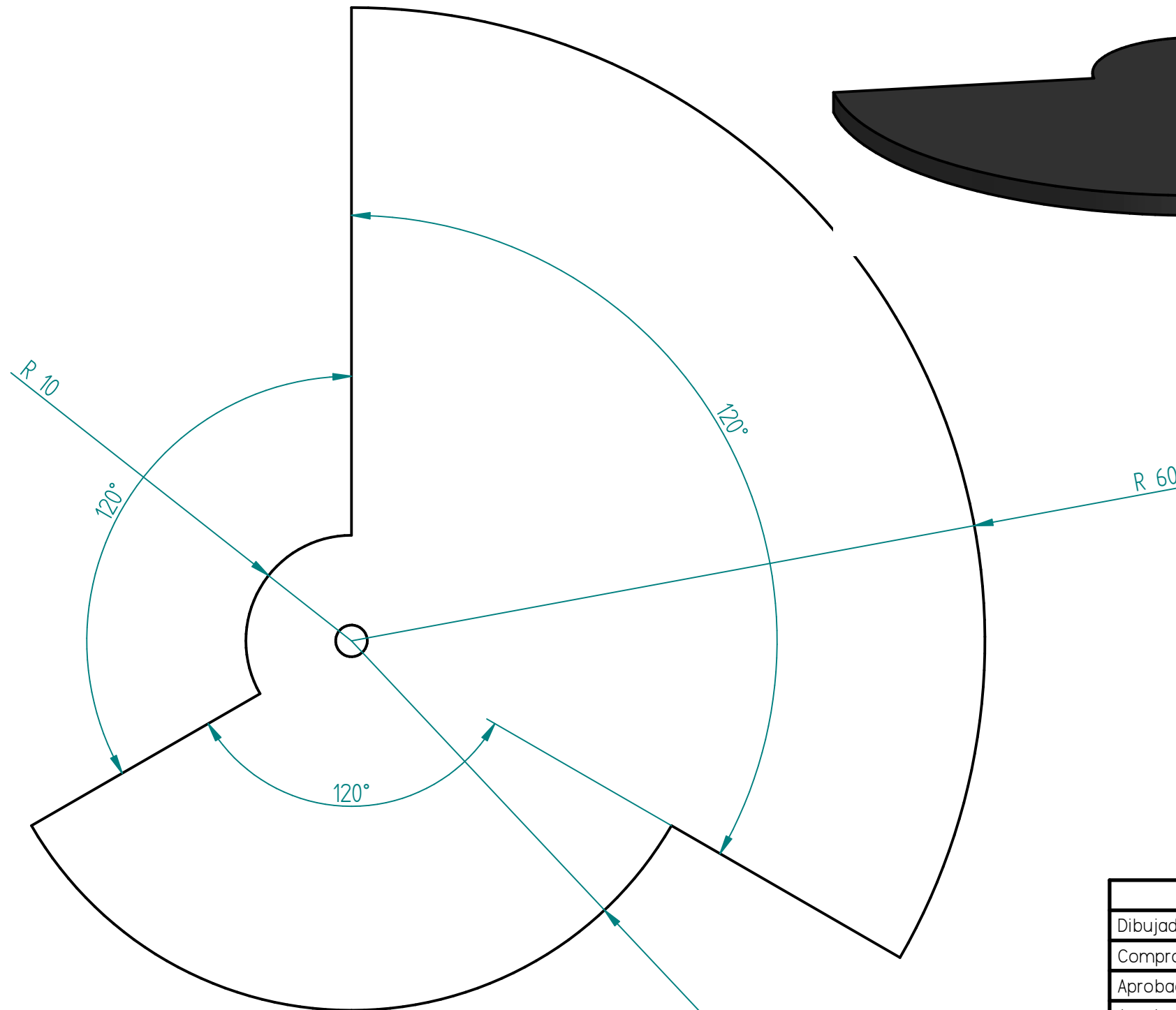
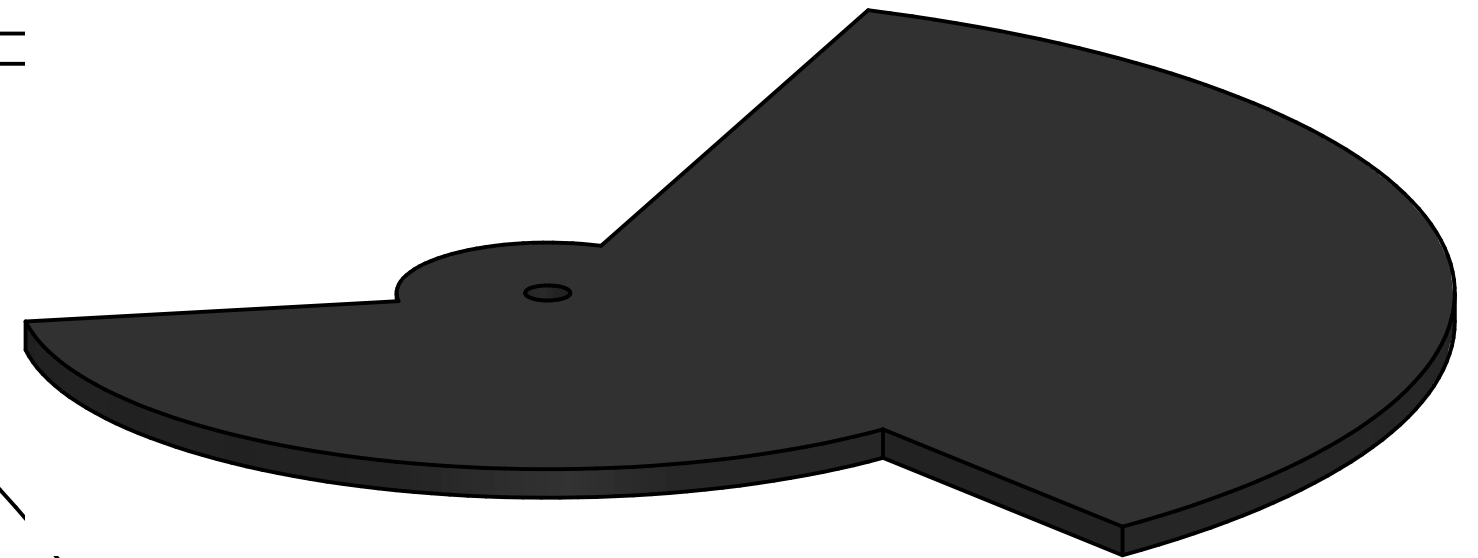
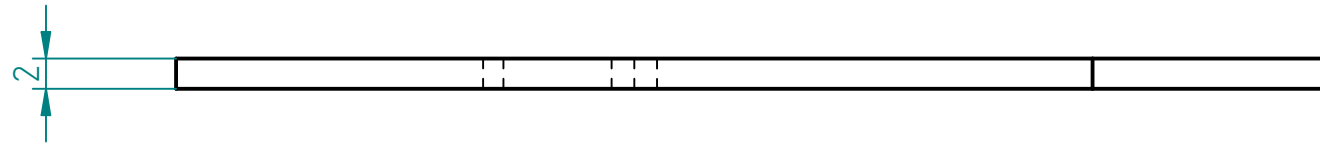
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



SOLID EDGE ACADEMIC COPY

	Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software	
Dibujado	Aitor			
Comprobado			Título Eje_tapa_alto	
Aprobado 1				
Aprobado 2			A3 Plano Rev	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°				
			Archivo: Eje_tapa_alto.dft	
			Escala	Peso
			Hoja 1 de 1	

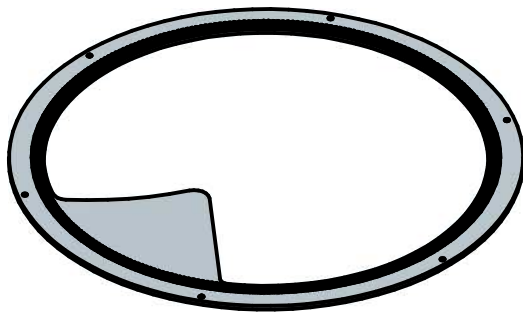
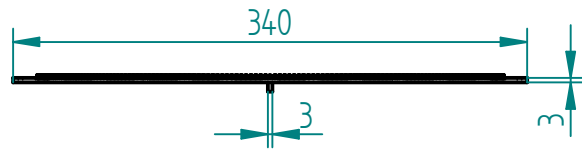
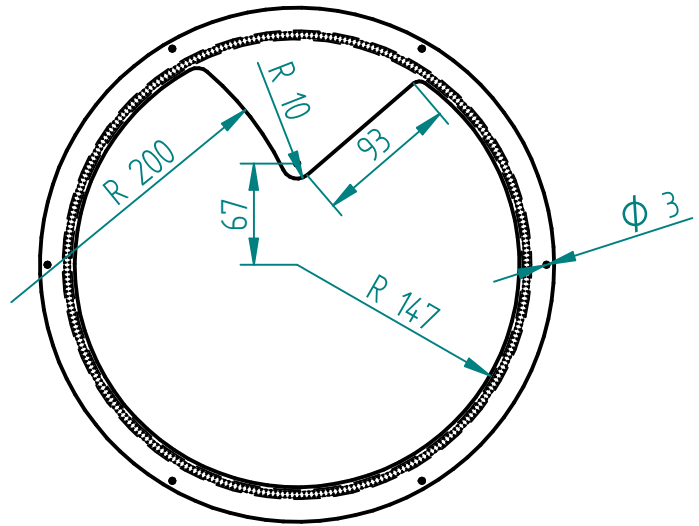
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software		
Dibujado	Aitor			
Comprobado		Título		
Aprobado 1		Obturador_rotatorio		
Aprobado 2		A3	Plano	Rev
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°		Archivo: Obturador rotatorio		
		Escala	Peso	Hoja 1 de 1

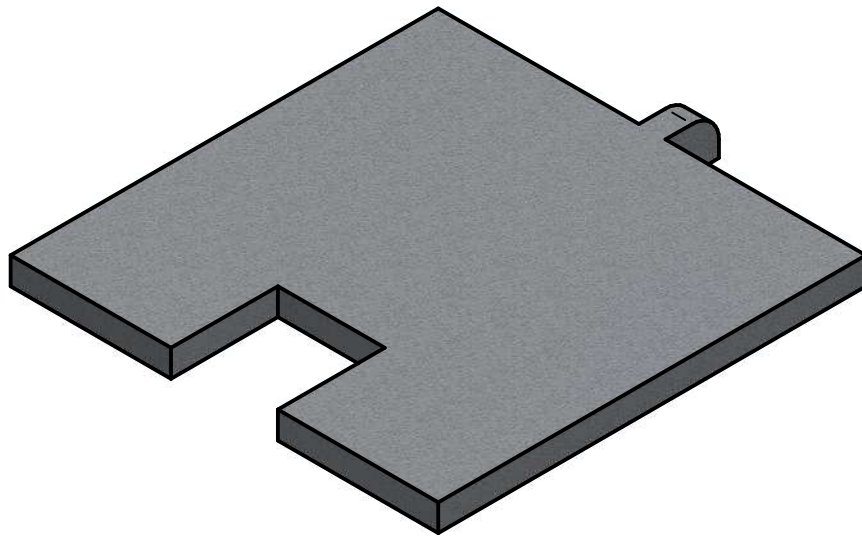
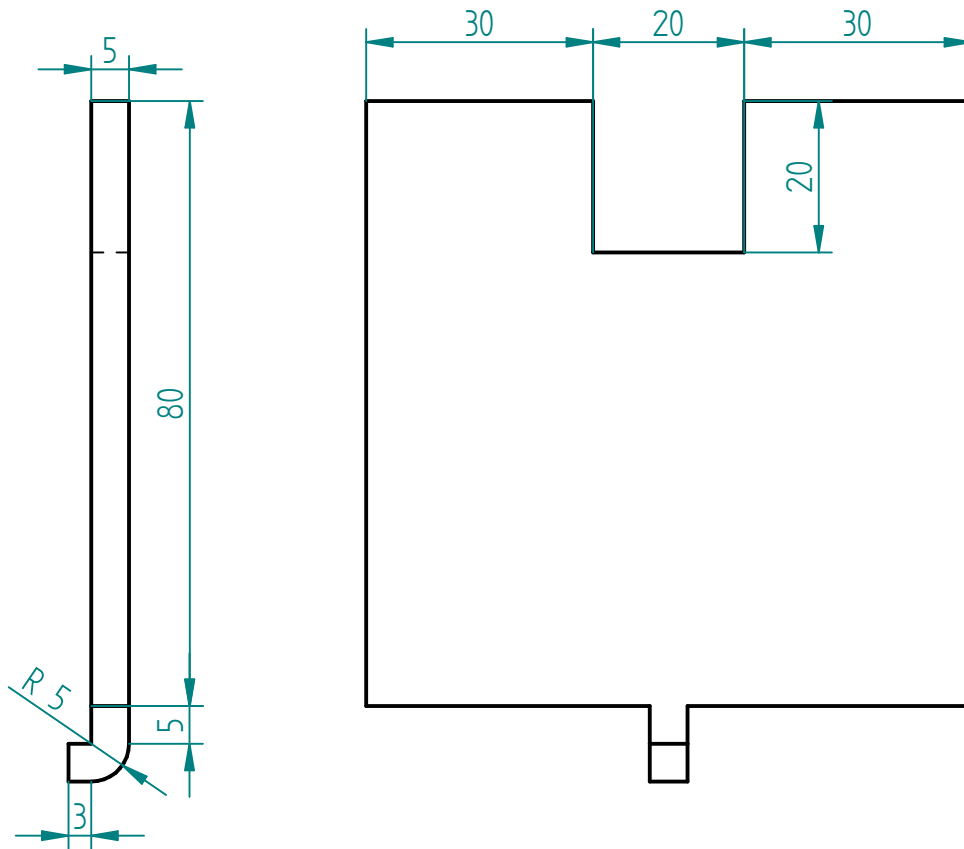
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



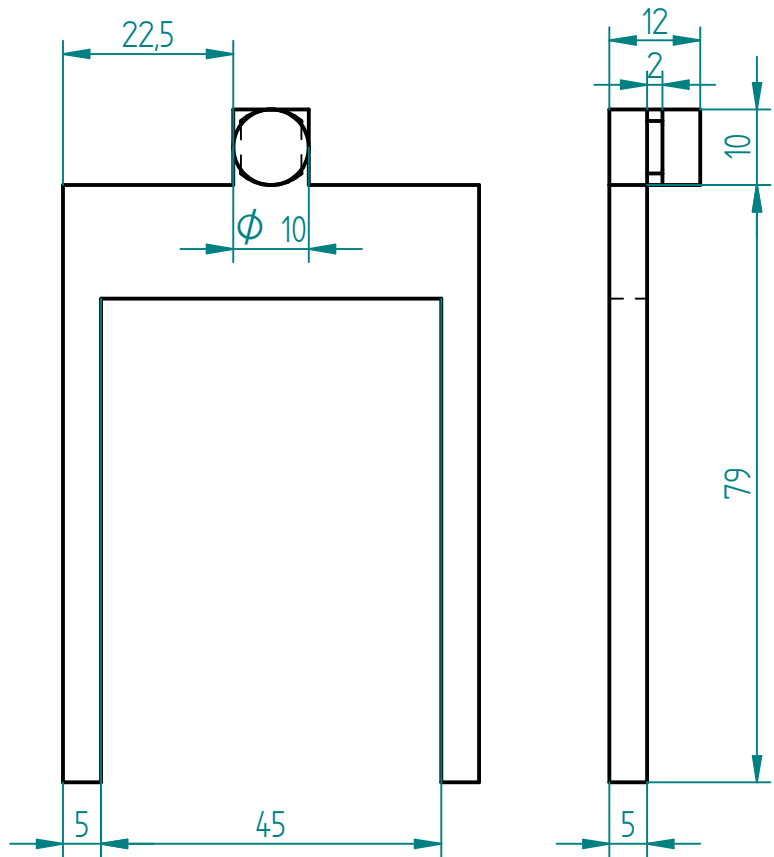
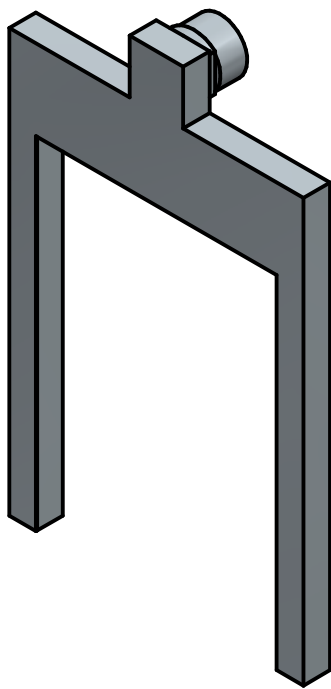
Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software		
Dibujado	Aitor Arano			
Comprobado		Título Mov_portamascaras		
Aprobado 1				
Aprobado 2		A4	Plano	Rev
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°		Archivo: Mov_portamascarasV2.dft		
		Escala	Peso	Hoja 1 de 1

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software		
Dibujado	Aitor Arano			
Comprobado		Título Placa Sustituta		
Aprobado 1				
Aprobado 2		A4	Plano	Rev
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$		Archivo: Placa_sustituta.dft		
		Escala	Peso	Hoja 1 de 1

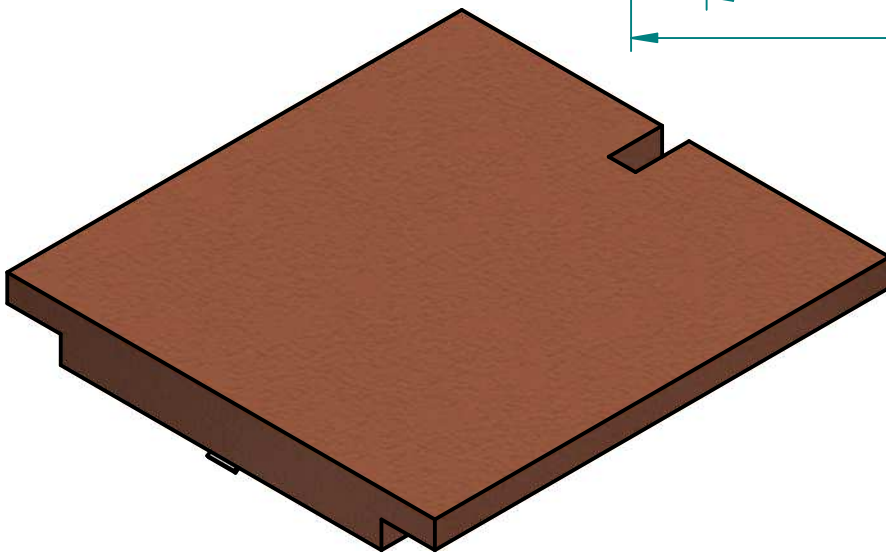
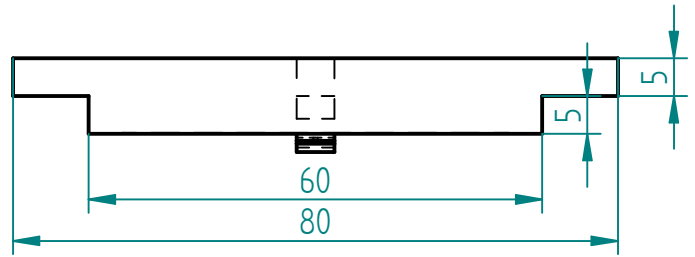
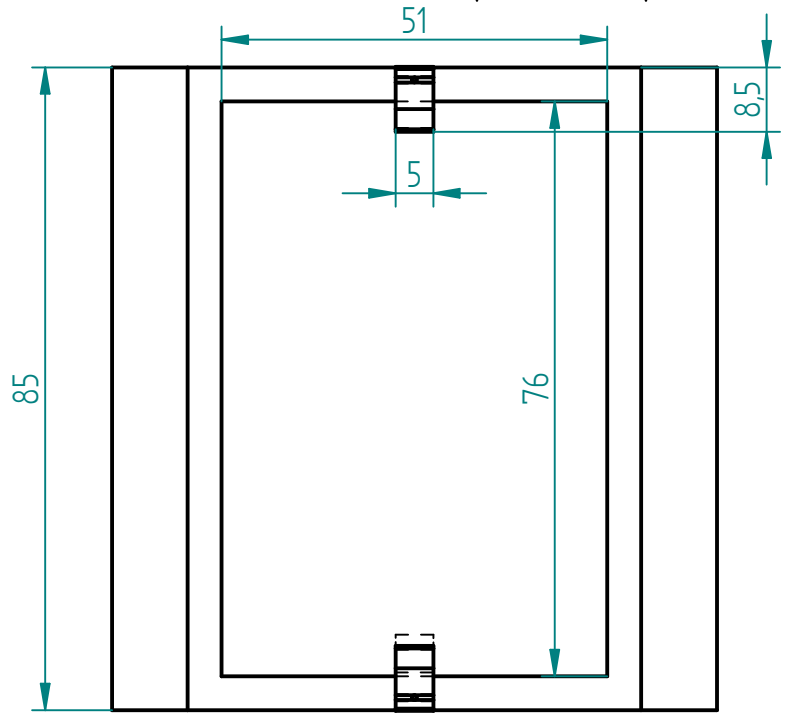
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software		
Dibujado	Aitor Arano			
Comprobado		Título Portamáscaras		
Aprobado 1				
Aprobado 2		A4	Plano	Rev
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$		Archivo: PortamáscarasV2.dft		
		Escala	Peso	Hoja 1 de 1

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

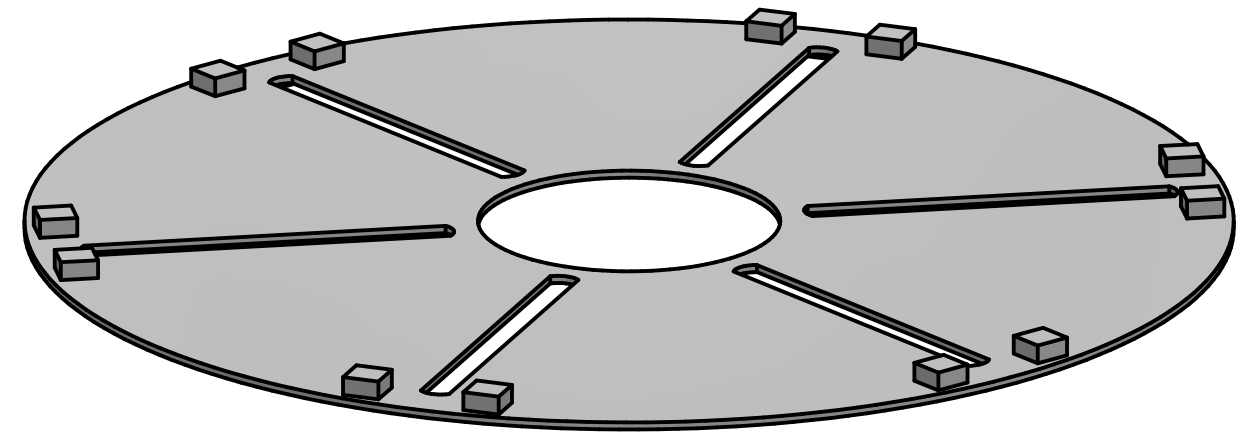
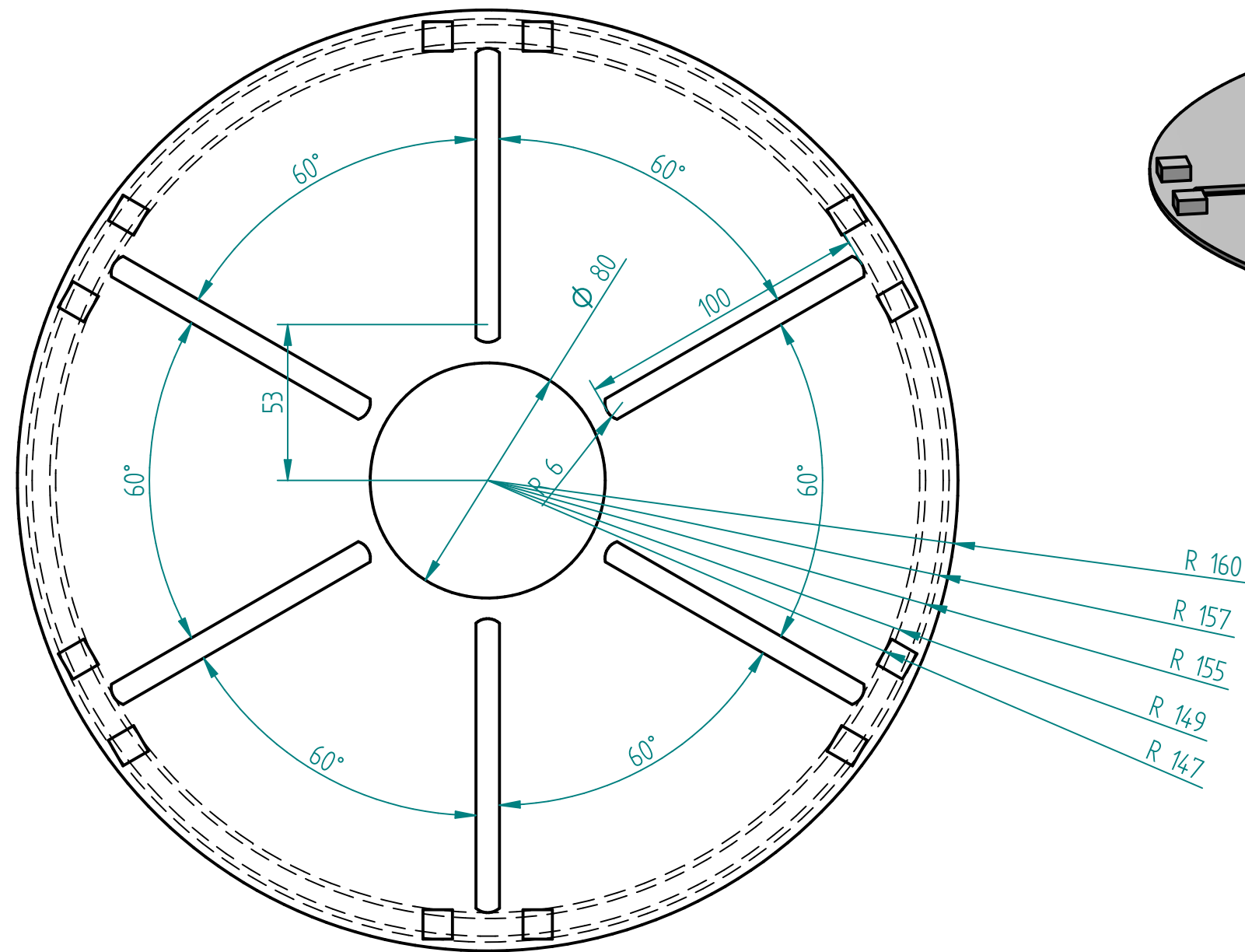
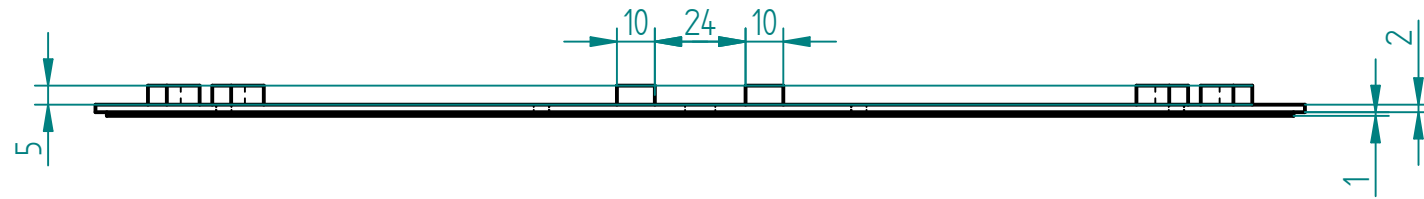
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software	
Dibujado: Aitor Arano		Título: Portasubstrato	
Comprobado:			
Aprobado 1:			
Aprobado 2:			
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°		A4 Plano	Rev
		Archivo: Portasubstrato.dft	
		Escala	Peso
		Hoja 1 de 1	

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

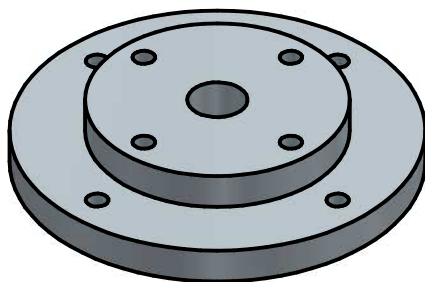
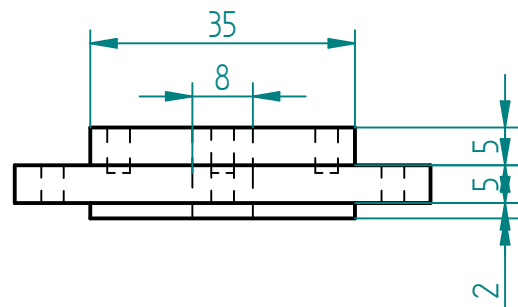
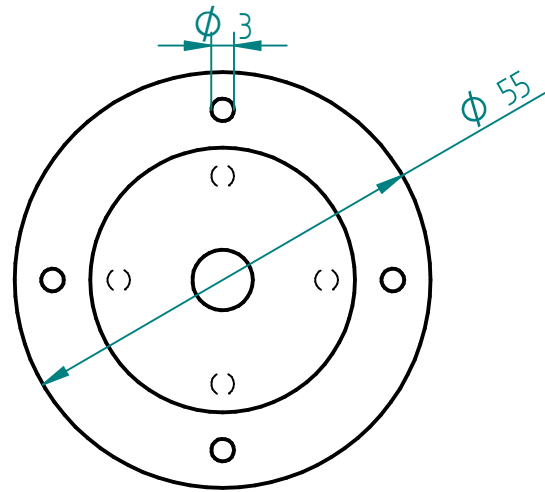
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



Nombre	Fecha	Solid Edge ST	
Dibujado: Aitor	Error: Sin referencia	Siemens PLM Software	
Comprobado		Título	
Aprobado 1		A3 Plano	
Aprobado 2		Rev	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°		Archivo: Plano2	
Escala	Peso	Hoja 1 de 1	

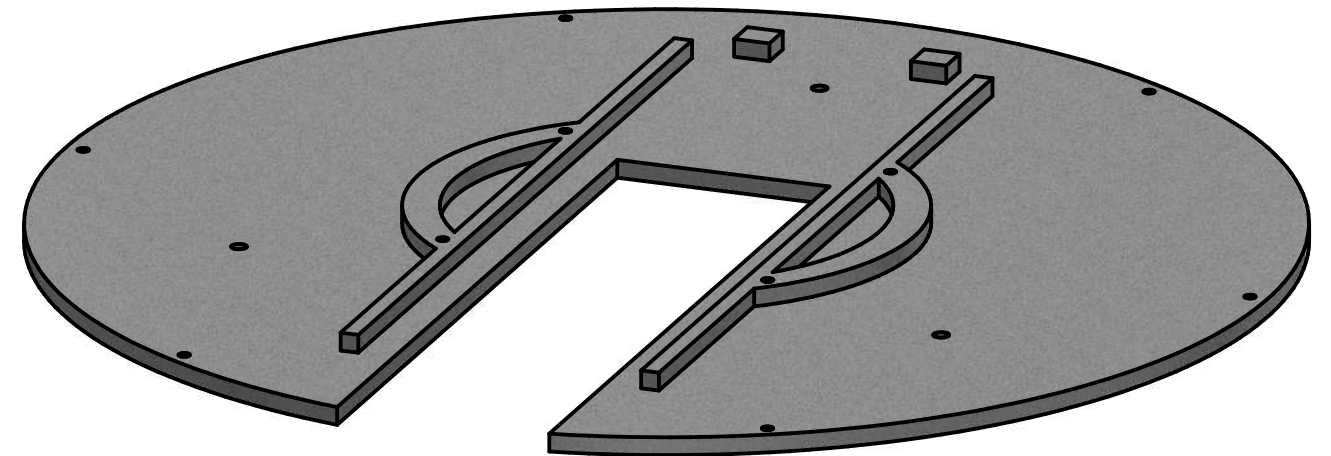
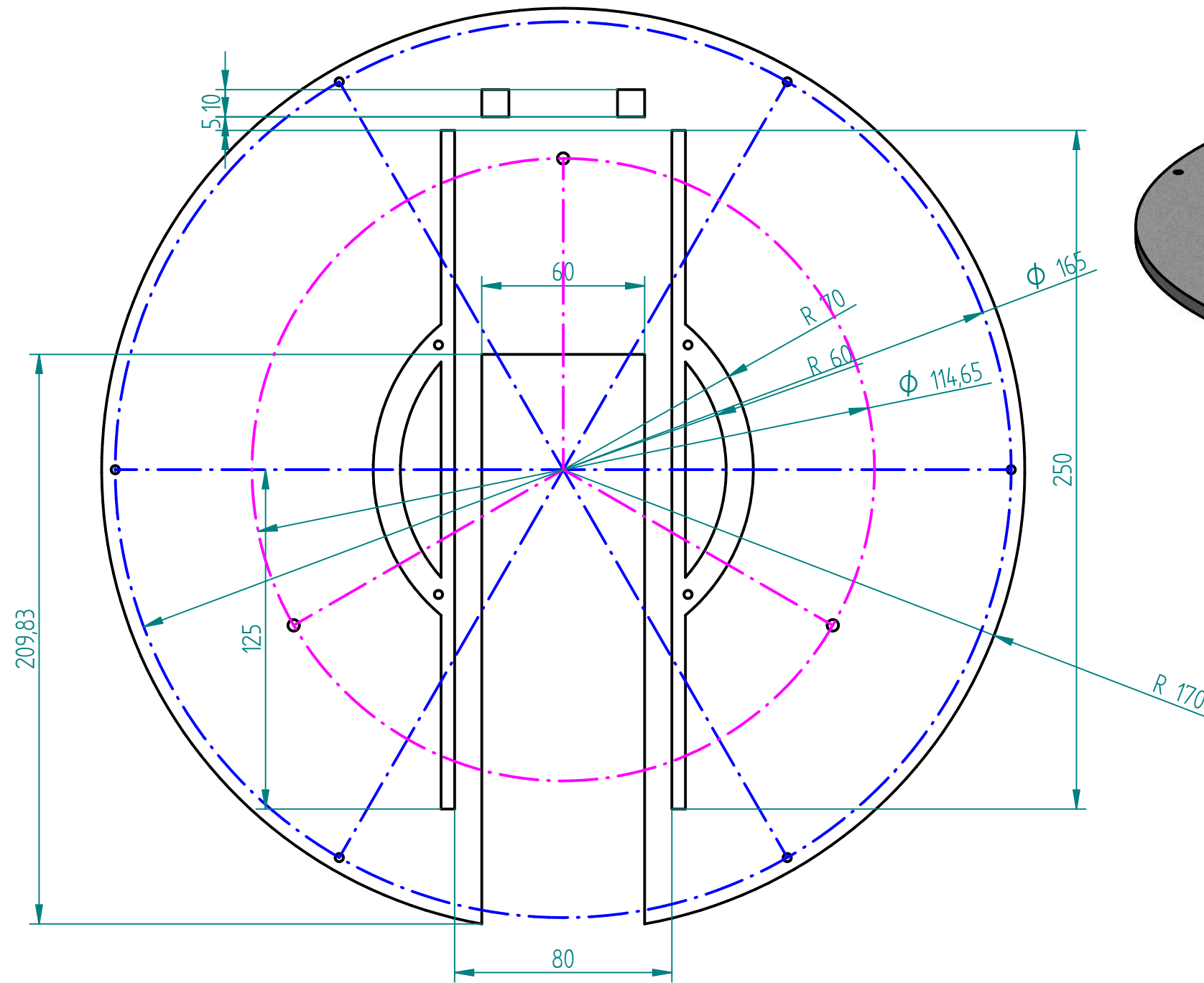
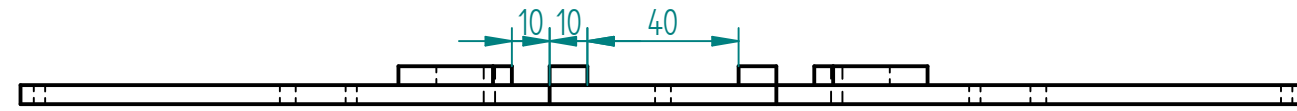
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



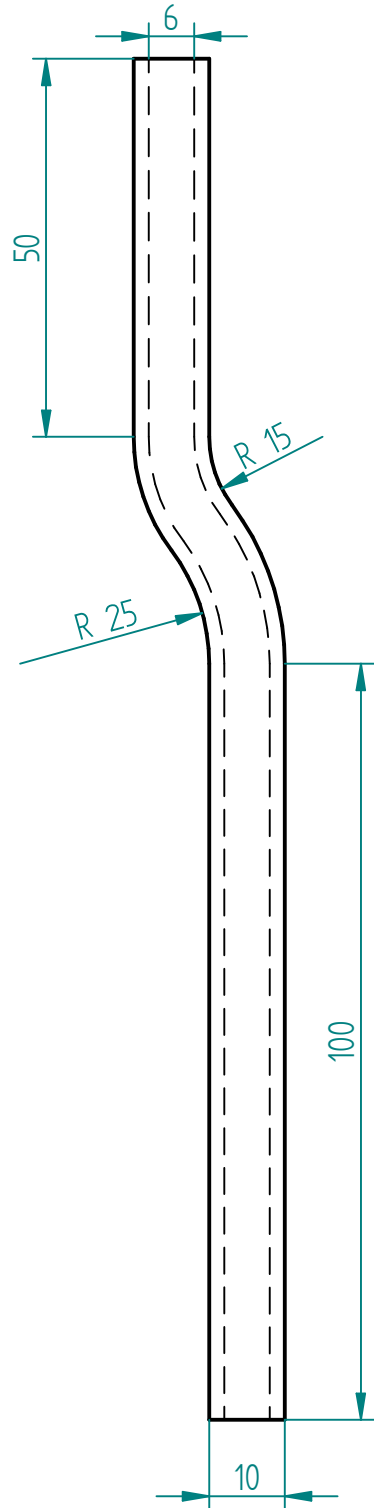
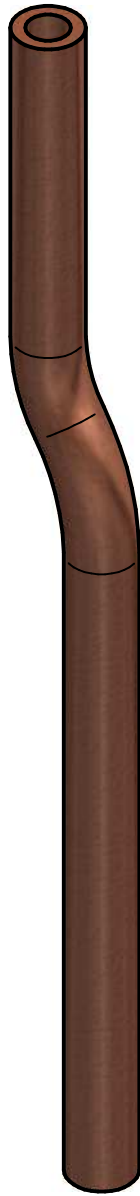
Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software		
Dibujado	Aitor Arano			
Comprobado		Título Separador		
Aprobado 1				
Aprobado 2		A4	Plano	Rev
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$		Archivo: Separador.dft		
		Escala	Peso	Hoja 1 de 1

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software	
Dibujado	Aitor		
Comprobado		Título	
Aprobado 1		Sujección_portasubstrato	
Aprobado 2		A3	Plano
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$		Rev	
		Archivo: Sujección_portasubstrato.dft	
Escala	Peso	Hoja 1 de 1	

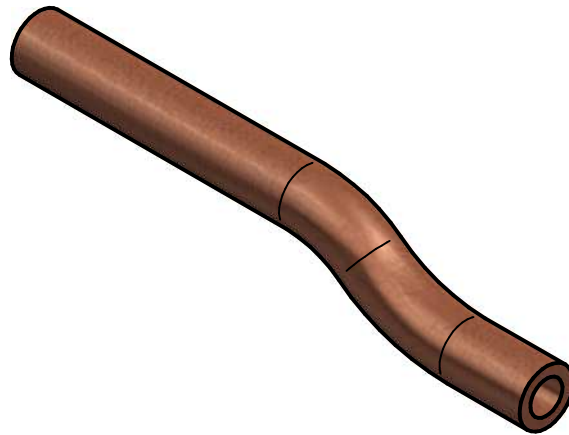
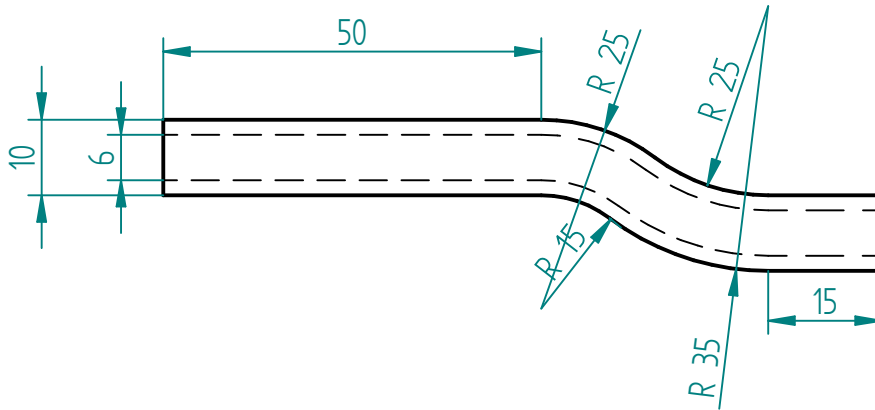
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software	
Dibujado	Aitor Arano		
Comprobado		Título	
Aprobado 1		Tubo in	
Aprobado 2		A4	Plano
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$		Archivo: Tubo_in.dft	
		Escala	Peso
		Hoja 1 de 1	

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

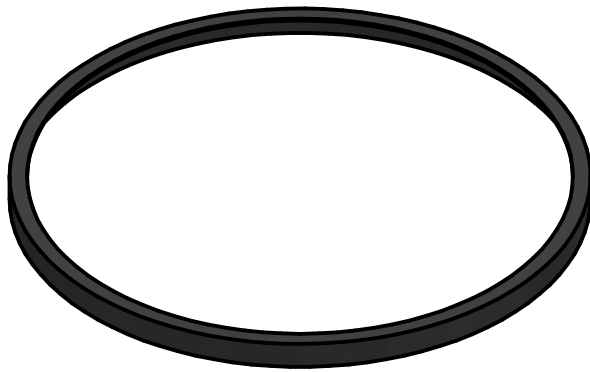
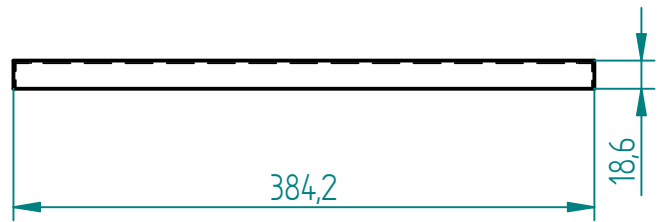
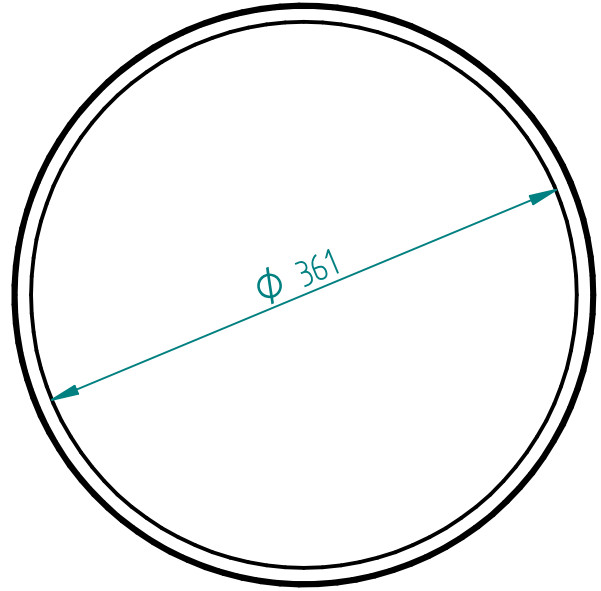
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software	
Dibujado	Aitor Arano		
Comprobado		Título	
Aprobado 1		Tubo out	
Aprobado 2		A4	Plano
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$		Rev	
		Archivo: Tubo_out.dft	
		Escala	Peso
		Hoja 1 de 1	

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

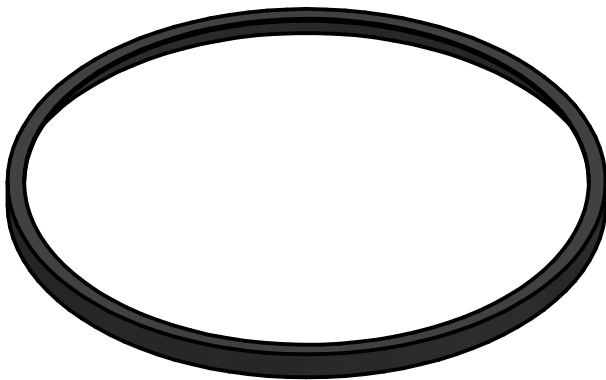
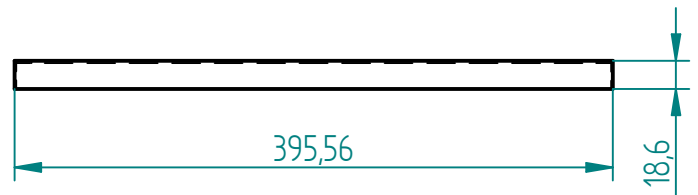
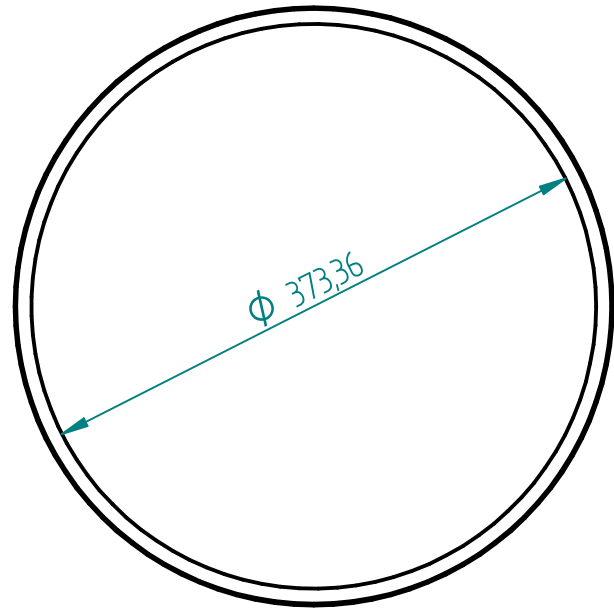
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



	Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software	
Dibujado	Aitor Arano			
Comprobado			Título Viton 10	
Aprobado 1				
Aprobado 2			A4 Plano Rev	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$			Archivo: Viton(10).dft	
			Escala	Peso

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



	Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software		
Dibujado	Aitor Arano				
Comprobado			Título Viton 8		
Aprobado 1					
Aprobado 2			A4	Plano	Rev
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$			Archivo: Viton(8).dft		
			Escala	Peso	Hoja 1 de 1

SOLID EDGE ACADEMIC COPY