

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Departamento de ingeniería térmica y de Fluidos
Área de Mecánica de Fluidos.



Ingeniería Técnica Industrial, Mecánica

PROYECTO FIN DE CARRERA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA BOMBA PARA SIMULACIÓN DE
FLUJO CARDIACO (II)**

Autor: Enrique Cobeño Sasiambarrena

Director: Jorge Arrieta Sanagustín

SEPTIEMBRE 2009

Agradecimientos:

Para dar vida a este proyecto, hemos tenido que darle mente, cuerpo y corazón.

La mente nos la ha dado nuestro tutor Jorge Arrieta Sanagustín, el cual nos guio en este proyecto y Javier Rodríguez Rodríguez que nos propuso la idea y ayudo en este viaje.

El cuerpo a los técnicos Israel Pina García y David Díaz González, que fabricaron y aconsejaron en la construcción.

Y el corazón a nuestra familia y amigos, que día a día nos han estado apoyando y acortando las horas de laboratorio.



ÍNDICE.

1. INTRODUCCIÓN	1
2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	1
3. BASES DEL ESTUDIO	2
4. EL CORAZÓN	3
4.1. SISTEMA CIRCULATORIO	4
4.1.1. Arteria carótida	5
4.1.2. Arteria aorta	6
5. ESTUDIO DE LAS BOMBAS COMERCIALES PARA SIMULACIÓN DE FLUJO CARDIACO	8
5.1. INTRODUCCIÓN	8
5.2. BOMBAS CENTRIFUGAS	8
5.3. BOMBAS VOLUMÉTRICAS	9
5.3.1. Bombas de paletas.	10
5.3.2. Bombas peristálticas	12
5.3.3. Bombas de Jeringa	15
5.3.4. Bombas de membrana o diafragma	16
5.3.5. Bomba de engranajes	17
5.3.6. Bombas de tornillo.	18
5.3.7. Bombas de émbolo o pistones.	21
5.4. CONCLUSIONES.	23
6. ESTUDIO TEÓRICO DEL PERFIL DE VELOCIDADES CERCANO A LA PARED DEL CILINDRO.	25
7. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES	30
7.1. INTRODUCCIÓN	30
7.2. SISTEMA PRINCIPAL	31
7.2.1. Émbolo	31
7.2.2. Tapa exterior y tapa interior	34
7.2.3. Cilindro	35
7.2.4. Guías	36
7.3. REUTILIZACIÓN, MODIFICACIÓN DE COMPONENTES Y ELEMENTOS DE ADAPTACIÓN.	37
7.3.1. Elementos reutilizados:	37
7.3.2. Elementos modificados:	37
7.3.3. Elementos de adaptación	38
7.4. SISTEMA ESTRUCTURAL	39
7.4.1. Tensores	39
7.4.2. Tapa motor y Estructura-interior	39
7.4.3. Sistema de enganche "Sándwich"	40
7.5. SISTEMA ELÉCTRICO	41
7.5.1. Motor eléctrico	41
7.5.2. Detectores de fin de carrera (Sensores)	47
8. ESTANQUEIDAD	49



8.1.	JUNTA HIDRÁULICA-----	49
8.2.	JUNTA TÓRICA -----	50
8.2.1.	<i>Funcionamiento</i> -----	50
8.2.2.	<i>Respecto al diseño de la ranura.</i> -----	50
8.2.3.	<i>Zonas estancas</i> -----	52
9.	PRESUPUESTO:-----	59
10.	CONCLUSIONES DEL PROYECTO-----	59
11.	PLANOS -----	60
12.	BIBLIOGRAFÍA -----	79



1. Introducción

Este proyecto es la mejora de una bomba de simulación de flujo cardíaco ya existente, la bomba presentaba una serie de problemas técnicos, los cuales impedían su buen funcionamiento, por ello se nos encargo un objetivo claro, un nuevo diseño teniendo en cuenta la experiencia del primer prototipo, pero mejorando la funcionalidad de sus componentes y su accesibilidad.

Para poder diseñar primero tenemos que comprender y sintetizar el funcionamiento del corazón, y del flujo cardíaco ya que su última finalidad es poder hacer la simulación del flujo sanguíneo.

2. Descripción del proyecto

El proyecto consiste en el diseño y construcción de una bomba, que simula los impulsos cardiacos que el corazón envía a las arterias.

Este prototipo contiene un motor paso a paso, controlado por un programa de ordenador, implementado en lenguaje C que utilizando las funciones del sistema operativo Real Time Linux, debido a que este sistema operativo nos garantiza, indicándole de forma sencilla, que los trenes de impulsos que son ordenados al motor sean en tiempo real, dándole prioridad sobre otros procesos. Se ha utilizado este método para controlar el movimiento del motor por las características indicadas anteriormente, por su bajo coste y su gran efectividad. Aunque hay procesos con mayor precisión que el utilizado, son mucho más costosos y por eso han sido descartados.

El funcionamiento de la bomba consiste en el movimiento lineal de un pistón, a través de un tornillo sin fin, que esta ensamblado de forma solidaria con el motor paso a paso, con el objetivo del mover el flujo, introducido en la bomba, simulando el pulso cardíaco deseado.

El flujo que bombeamos recorre 2 circuitos, el primero lo denominamos circuito de entrada, como su nombre indica por el pasa el fluido que entra dentro de la cámara de la bomba y el segundo el de salida. Para que el flujo simule el recorrido de la sangre por las venas y arterias, introducimos 2 electroválvulas de tres vías, una convergente y otra divergente, entre la bomba y el depósito abierto para hacer el flujo continuo.

Todo el sistema está controlado, como hemos indicado anteriormente por el ordenador, ya que en la bomba hay instalados 2 sensores en el pistón que junto con los 2 de las tapas, controlamos la carrera del pistón. Tanto los sensores como las electroválvulas están conectados el ordenador a través del circuito eléctrico.

El funcionamiento del prototipo tiene que dar como resultado, la simulación del pulso cardíaco de la arteria aorta, pero debido al gran caudal de la aorta, el objetivo mínimo marcado, es la simulación del flujo de la arteria carótida, debido a que su caudal es menor y con mayor regularidad.

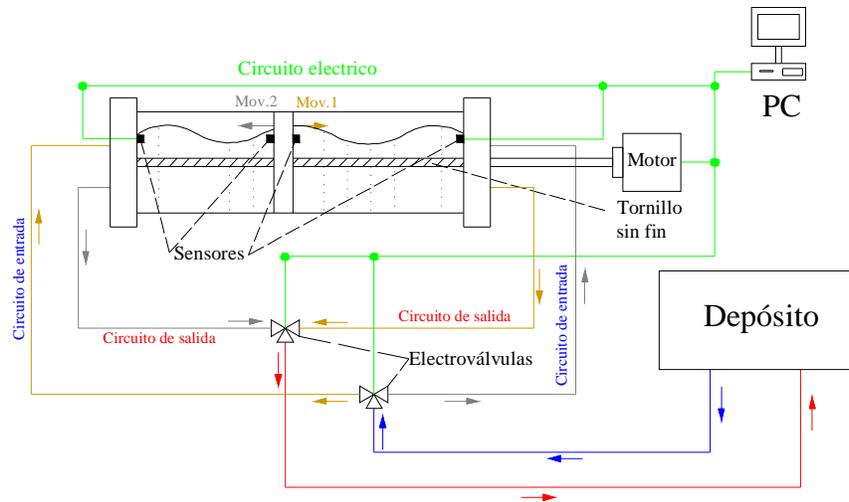


Figura 1
Esquema de funcionamiento.

3. Bases del estudio

Para abordar el proyecto hemos tenido basarnos en las mismas bases del proyecto anterior, así pues hemos hecho un estudio del sistema circulatorio, el corazón y de las principales venas/arterias, por otro lado hemos hecho un estudio de las bombas existentes en el mercado actual para tener un mayor conocimiento de su funcionamiento y poder aplicar aquello que beneficie su funcionamiento.

Cabe destacar que nuestro proyecto al ser un trabajo biomecánico, es decir, tiene por objeto el estudio de las estructuras de carácter mecánico que existen en los seres vivos, para llevar a cabo una prototipo mecánico de un órgano, en este caso el corazón, ya que emularemos sus pulsos con esta bomba.



4. El corazón

El corazón es el órgano principal del aparato circulatorio, es un músculo hueco que actúa como una bomba aspirante e impelente, aspira a través de las aurículas la sangre que circula por las venas, alrededor de 5 l/min, y la impulsa desde los ventrículos hacia las arterias. En un minuto es capaz de bombear sangre a cada célula del cuerpo, latiendo un promedio de 70 veces por minuto en estado de reposo, y pesa aproximadamente 450 gramos.

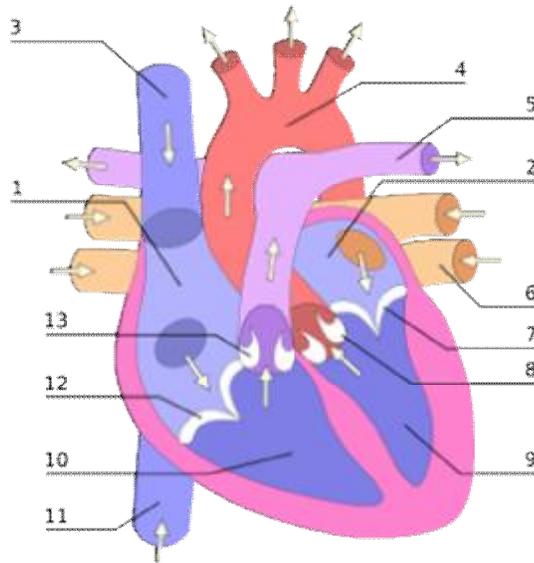


Figura 1

Partes del corazón: 1. Atrio derecho 2. Atrio izquierdo 3. Vena cava superior 4. Aorta 5. Arteria pulmonar 6. Vena pulmonar 7. Válvula mitral o bicúspide 8. Válvula aórtica 9. Ventrículo izquierdo 10. Ventrículo derecho 11. Vena cava inferior 12. Válvula tricúspide 13. Válvula pulmonar

El corazón se divide en dos mitades laterales, la parte derecha, en la que circula la sangre venosa y la parte izquierda, en la que circula sangre arterial. Cada una de estas dos mitades se subdivide en otras dos, situadas una encima de otra que son: la cavidad superior llamada aurícula o atrio, y la cavidad inferior llamada ventrículo. Cada aurícula comunica con el ventrículo por medio de un orificio llamado orificio auriculoventricular, que contiene una válvula mitral. Las dos mitades del corazón están separadas en toda su altura, por medio de un tabique vertical que se llama tabique interauricular entre las dos aurículas y tabique interventricular entre los ventrículos.

Cada latido del corazón desencadena una secuencia de eventos llamados ciclo cardíaco creando condiciones pulsátiles en todas las venas y arterias, esta pulsación se subdivide principalmente en tres etapas: sístole auricular, sístole ventricular y diástole.

Durante la sístole auricular, las aurículas se contraen y proyectan la sangre hacia los ventrículos. Una vez que la sangre ha sido expulsada de las aurículas, las válvulas auriculoventriculares se cierran. Esto evita el reflujo de sangre hacia las aurículas. La sístole ventricular implica la contracción de los ventrículos expulsando la sangre hacia



el sistema circulatorio. Una vez que la sangre es expulsada, las dos válvulas sigmoideas, la válvula pulmonar en la derecha y la válvula aórtica en la izquierda se cierran.

Por último la diástole es la relajación es la relajación de todas las partes del corazón para permitir la llegada de nueva sangre.

4.1. Sistema circulatorio

El sistema circulatorio es el encargado de llevar los alimentos, el oxígeno a las células y recoger los desechos metabólicos, que se han de eliminar mediante dos circuitos complementarios, llamados circulación mayor o general y menor o pulmonar.

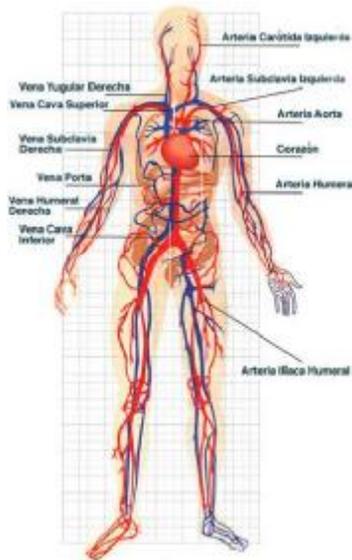


Figura 2

En la figura se puede apreciar los dos circuitos de circulación de la sangre

La sangre circula por las venas, arterias y capilares, el diámetro de los mismos disminuye gradualmente, a medida que se alejan del corazón; al mismo tiempo, disminuye también el espesor de sus paredes. De las grandes arterias, como la aorta, cuyo diámetro es de 2,5 a 3,0 cm aproximadamente y cuya pared es relativamente gruesa, se pasa a arteriolas de un diámetro medio de 0,2 milímetros y una pared muy delgada. Las arterias tienen una forma regularmente cilíndrica, incluso cuando están vacías de sangre, esta característica es debida al notable espesor y a la estructura muscular y elástica de la pared, que permite distinguirlas fácilmente de las venas, que en cambio, se relajan cuando están vacías. Debido a las fibras de músculo liso elásticas, las arterias se distienden al paso de la ola sanguínea (que corresponde a la fase de contracción, sístole, del corazón) y, sucesivamente, se estrechan, favoreciendo así el progresivo avance.

La sangre va por el sistema circulatorio y tiene un comportamiento no newtoniano, es decir no tiene un valor de viscosidad definido y constante, esto es porque está compuesto por agua y sustancias orgánicas e inorgánicas disueltas en la misma, es decir en una gota de sangre contiene aproximadamente unos 5 millones de glóbulos rojos, de 5.000 a 10.000 glóbulos blancos y alrededor de 250.000 plaquetas. Debido a esta



naturaleza su densidad no es constante, ronda entre $1480-1600\text{Kg/m}^3$ y su temperatura en condiciones normales es 37°C .

Dentro del sistema circulatorio cabe destacar dos arterias que cabe destacar debido a la cantidad de sangra que circula por ellas, la arteria carótida y la aorta.

4.1.1. Arteria carótida

Las arterias carótidas son cada una de las dos arterias, derecha e izquierda, que discurren en su mayor parte a ambos lados del cuello y que irrigan tanto el cuello como la cabeza. Las arterias carótidas inicialmente se llaman arterias carótidas primitivas o carótidas comunes y después se bifurcan en arteria carótida externa y arteria carótida interna, (ver Figura 3).

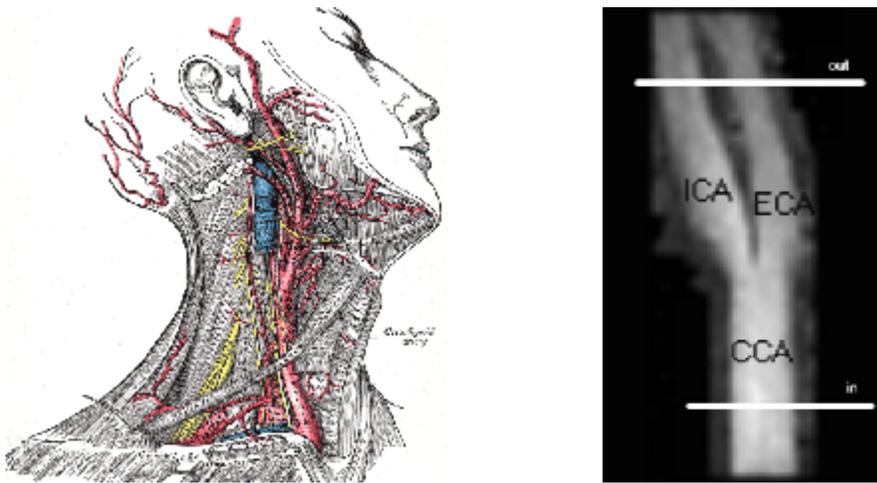


Figura 3

En la imagen de la izquierda se ve la posición de las carótidas en el cuello y en la imagen de la derecha se muestra la bifurcación existente en las arterias carótidas (common carotid arteries, CCA), que pasan a ser arterias carótidas externas (External carotid arteries, ECA) y arterias carótidas internas (internal carotid arteries, ICA).

El caudal promedio que pasa por esta arteria es aproximadamente de $6,16\text{ ml/s}$ en CCA, $4,14\text{ml/s}$ en ICA y $1,59\text{ ml/s}$ en ECA. Tomando valor máximo en CCA a $11,7\text{ml/s}$ y mínimo en ECA con un valor de 1ml/s .

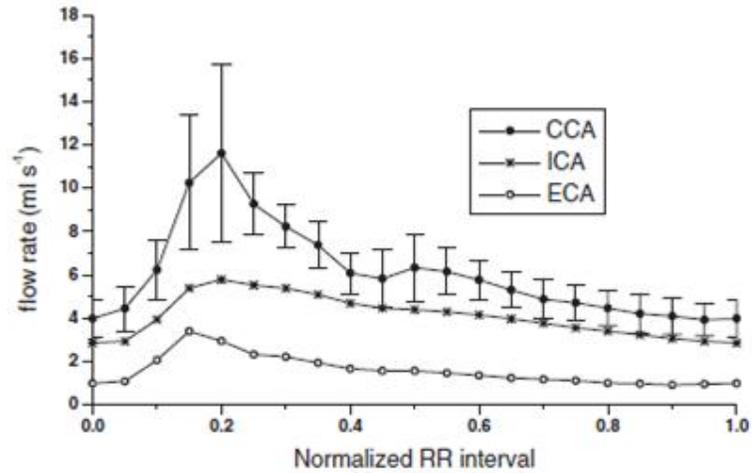


Figura 4

Grupo de formas de onda de flujo arterial media (n = 14 arterias) para el común (CCA), interior (ICA) y externo (ECA) carótidas.

4.1.2. Arteria aorta

Es la principal arteria del cuerpo humano. Sale directamente de la base del ventrículo izquierdo del corazón y, formando un arco llamado el cayado aórtico, que desciende hacia el abdomen donde, a la altura de la IV vértebra lumbar, se bifurca en tres arterias, las ilíacas primitivas, que irrigan la pelvis y el miembro inferior, y la arteria sacra media, que se dirige a parte del recto. La aorta da origen a todas las arterias del sistema circulatorio, excepto a las arterias pulmonares, que salen del ventrículo derecho.

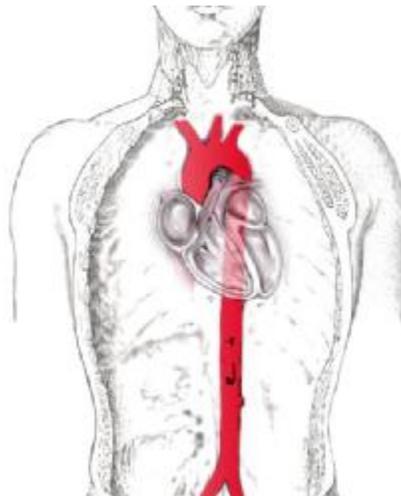


Figura 5

Esquema de la posición de la arteria aorta en el cuerpo.

En la figura 6 mostramos de forma grafica el caudal sanguíneo en la aorta, en el cual podemos ver que hay un máximo de valor aproximado de 203 ml/s, que corresponde a la sístole ventricular, y un reflujo denominado insuficiencia aórtica de valor aproximado de -67 ml/s, que corresponde a la diástole del corazón ventricular.

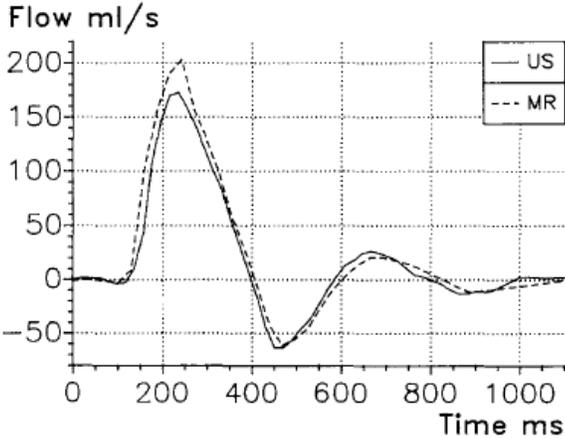


Figura 6

Toma de datos de la velocidad de la sangre en la aorta tomados con resonancia magnética (MR) y con ultrasonido (US) por la universidad de Zurich.



5. Estudio de las bombas comerciales para simulación de flujo cardiaco

5.1. Introducción

En esta parte nos dedicaremos a hacer un estudio de la técnica, de las distintas bombas comerciales, veremos sus características, su funcionamiento básico, y analizaremos en función a sus características su posible uso en nuestro proyecto.

Existen dos tipos básicos de bombas las volumétricas y las centrífugas, con un funcionamiento totalmente distinto que a continuación pasaremos a describir.

5.2. Bombas centrífugas

El funcionamiento de este tipo de bomba se basa en el principio del incremento de la cantidad de movimiento angular del líquido, es decir, incrementar de forma importante la energía cinética del líquido, para a continuación, transformarla en presión mediante la disminución de la velocidad del líquido.

El incremento de energía cinética, se consigue mediante un rotor que da al líquido una gran cantidad de movimiento angular. La transformación de la energía cinética en presión se consigue mediante unas carcasas en forma de espiral y también a través de las aletas directrices que se sitúan a la salida del rotor.

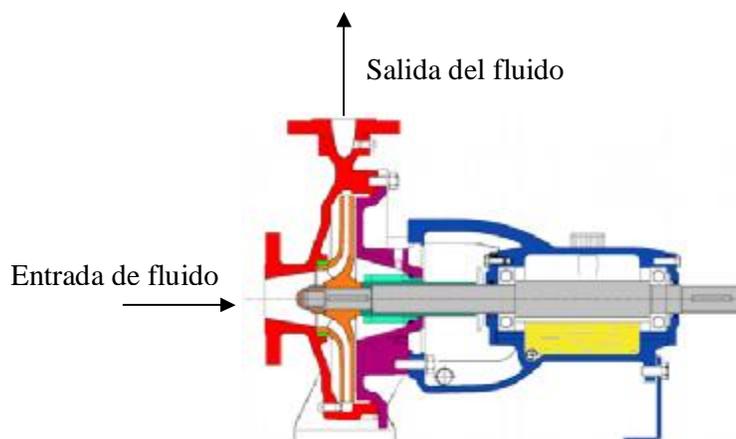


Figura 1
Esquema de funcionamiento de una bomba centrífuga.



A continuación se muestra una tabla en la que se indican datos técnicos de las bombas según los tipos:

Tipo de bomba	Gasto [m ³ /h]	Altura de elevación [m]	Potencia de bomba [HP]	Eficiencia η_B
Volumétricas de desplazamiento de alta presión.	ene-30	1600 - 6400	10 - 600	0,65 - 0,78
Volumétricas de desplazamiento de media presión.	1 - 100	40 - 1600	0,5 - 90	0,5 - 0,72
Rotodinámicas de auto-succión	ene-30	10 - 100	ene-18	0,3
Centrífugas de un paso	6 - 500	4 - 120	0,4 - 300	0,4 - 0,78
Centrífugas de un paso y rotor doble	500 - 40000	16 - 100	60 - 150000	0,73 - 0,9
Centrifugas radio-axiales	250 - 50000	jun-40	1 - 80000	0,65 - 0,9
Rotodinámicas, axiales	250 - 80000	feb-20	10 - 50000	0,65 - 0,88
Centrífugas de varios pasos	30 - 500	160 - 1800	70 - 500	0,6 - 0,82

Tabla 1

5.3. Bombas volumétricas

El principio de funcionamiento de las bombas volumétricas, se basa en el cambio de volumen de una cámara o recinto, obligando por ello a que se desplace el líquido que en determinado momento ocupa dicho recinto, este desplazamiento se puede realizar a través de émbolos, engranajes, etc. Otra de las características de este tipo de bombas es que la cavidad de recepción o cámara de aspiración, esta comunicada a través de unos espacios diseñados para ello, con la cavidad de descarga o cámara de impulsión, pudiendo tener una o varias cámaras de trabajo.

El gasto de estas bombas, depende de los volúmenes o dimensiones de la máquina y de la velocidad con que funcionan. Las presiones que pueden alcanzarse dependen de la potencia de los motores que las mueven y de la resistencia de los materiales con los que se han construido. Si se ignoran las pérdidas por fugas en estas máquinas, puede decirse que el gasto y la presión en ellas, con independientes entre sí.



Las presiones de salida del líquido, o la altura a la que puede elevarse dicho líquido por medio de estas bombas, son generalmente grandes.

Las velocidades de funcionamiento de las bombas volumétricas son bajas en comparación con las rotodinámicas, ya que en las bombas volumétricas las piezas móviles y sus mecanismos son pesados y complejos, respectivamente; en consecuencia, los gastos que pueden obtener resultan bajos en comparación con las bombas rotodinámicas.

El ajuste preciso de las piezas móviles en estas bombas les da una gran capacidad de succión, comparadas con la relativamente baja capacidad de succión de las bombas centrífugas.

Las bombas volumétricas, no son aptas para el manejo de líquidos contaminados con partículas sólidas, como los lodos, pues el ajuste de sus piezas móviles se perdería por la acción abrasiva.

El ruido producido por las bombas volumétricas, es más intenso que el producido por las bombas rotodinámicas, por la complejidad de los mecanismos.

Por la misma complejidad mecánica de las bombas volumétricas, comparada con la simplicidad de las rotodinámicas, los costos de conservación de las bombas volumétricas son más altos que los correspondientes a las bombas rotodinámicas. Por la misma razón, el tiempo de operación de las bombas volumétricas es más corto que el correspondiente a las bombas rotodinámicas.

Existen varios tipos de bombas volumétricas; en este estudio veremos las siguientes:

- Bombas de paletas.
- Bombas peristálticas.
- Bombas de jeringa.
- Bombas de membrana o diafragma.
- Bombas de engranajes.
- Bombas de tornillo.
- Bombas de embolo o pistón.

5.3.1. Bombas de paletas.

El principio de funcionamiento de este tipo de bombas consiste en el giro del rotor y el movimiento de las paletas provocando la transferencia del fluido dentro del cuerpo de la bomba (en movimiento continuo) desde la aspiración hasta la descarga.

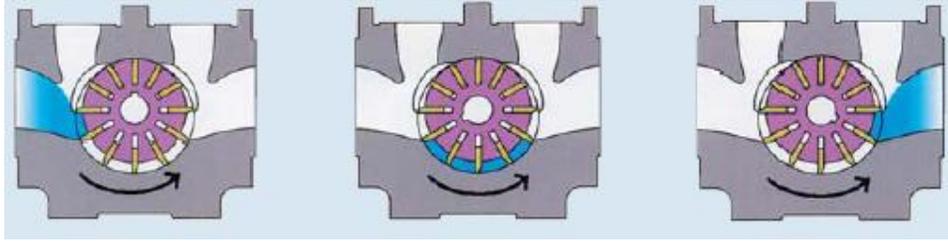


Figura 2

Esquema de funcionamiento de una bomba de paleta, donde se ve la progresión del fluido a lo largo de la bomba

Partes de la bomba:

Cuerpo de la bomba: En función de tipo de producto a bombear y del entorno de la bomba, existen tres posibles construcciones (Fundición, Acero o acero Inoxidable).

Cierres mecánicos: Dependiendo de las necesidades, la bomba podrá ser equipada con cierres mecánicos simples o dobles normalizados.

Paletas: en función del tipo de producto a bombear y de las condiciones de funcionamiento, la bomba irá equipada con paletas en polímeros o metálicas.

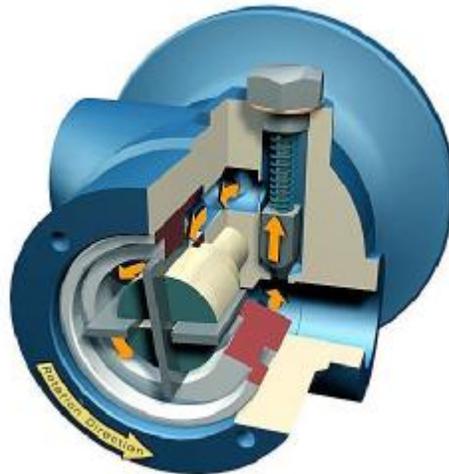


Figura 3

Bomba de paletas.

Como ejemplo veremos el rendimiento de este tipo de bombas para un líquido con viscosidad de 10 Centistokes ($10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) es la siguiente.

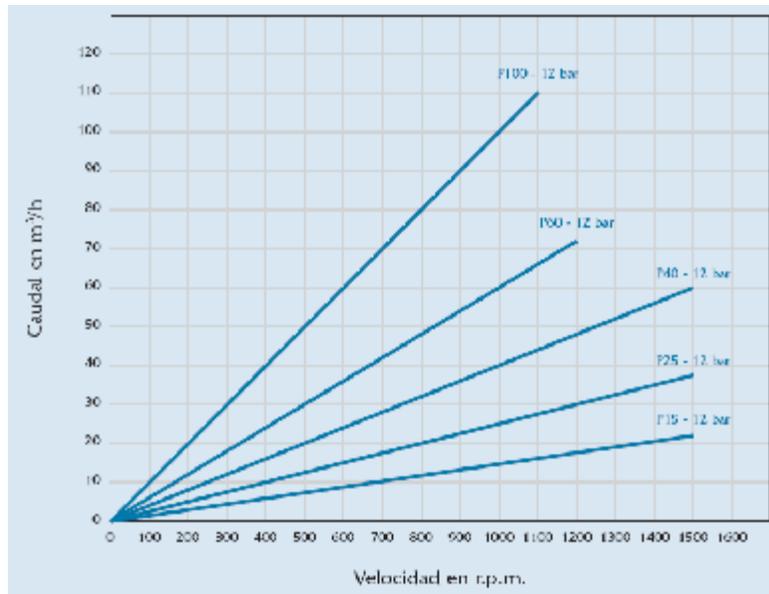


Figura 4
Gráfica orientativa caudal-velocidad para bombas de paletas.

Este tipo de bombas suele ser bastante pesada y aparatosas, a continuación le mostramos unos valores significativos sobre sus dimensiones.

	Peso	Longitud	Anchura	Altura	Volumen
Mínimo	50 Kg	525 mm	250 mm	325 mm	42656250 mm ³
Máximo	1400 Kg	925 mm	850 mm	1130 mm	888462500 mm ³

Tabla 2

Su principal clasificación es:

- Bombas de paletas rígidas.
- Bombas de paletas flexibles.

Sus principales ventajas son su mantenimiento rápido y sencillo, no comprimimos el fluido, solo empuja y arrastra con lo que puede bombear fluidos de alta viscosidad, un gran poder de aspiración y su sencillez técnica.

Estas cualidades lo hacen idóneo para el sector petrolífero y químico debido a su capacidad de poder bombear cualquier tipo de fluido.

5.3.2. Bombas peristálticas

Una bomba peristáltica es un tipo de bomba de desplazamiento positivo, usada para bombear variedad de fluidos. El fluido es contenido dentro de un tubo flexible empotrado dentro de la cubierta de la bomba.



En el caso de las bombas peristálticas, la presión se produce gracias a una serie de rodillos o “proyecciones de dedos” que presionan, intermitentemente, la línea de infusión de forma que el fluido es empujado a través del tubo.

Si los rodillos se encuentran alrededor de un eje central que gira se denomina bombas peristálticas rotatorias, mientras que si el tubo es presionado por una serie de dientes en sucesión cíclica (“proyecciones de dedos”) se denominan peristálticas lineales (Figura 5). Estas últimas poseen un espacio muerto entre el final de un ciclo y el comienzo del siguiente, lo que provoca una pequeña y transitoria disminución de la velocidad del flujo. Para evitarlo se han desarrollado mecanismos que eliminan dicho espacio muerto, obteniéndose las denominadas bombas peristálticas de aceleración.

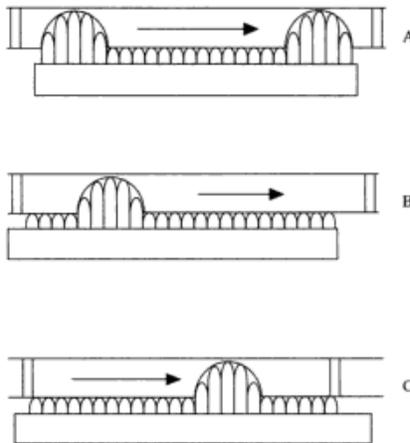


Figura 5

Aspecto del mecanismo de funcionamiento de una bomba peristáltica lineal. (a) Comienzo de ciclo. (b) Parte intermedia. (c) Avance del ciclo.

Las bombas peristálticas rotatorias funcionan por aplastamiento y deslizamiento una membrana tubular, por medio de un juego de rodillos que giran solidariamente sobre el eje.

La alternancia entre la compresión y la expansión del elemento tubular, genera un movimiento constante en el fluido bombeado. Su flujo de aspiración puede variar entre 0 y 50 ml/min, y el nivel de depresión, entre 0 y 550 mm Hg. (Figura 6).

Algunos modelos de estas máquinas llevan instaladas dos tuberías flexibles en paralelo, con dos conjuntos de rodillos desfasados 90°, que mejoran la regularidad y el funcionamiento de la máquina.



Figura 6
Funcionamiento de una bomba peristáltica

Este tipo de bombas que suministran fluido a baja velocidad tienen la ventaja de suministrar fluido de forma continua y ningún elemento mecánico está en contacto directo con el fluido, además las bombas peristálticas suelen ser más precisas que los controladores, pero menos que las denominadas de cassette o que las de jeringa, ya que las presiones y el rozamiento al que continuamente se ve sometida la línea provocan su deformación con el consiguiente incremento de la flexibilidad y del tamaño de la luz del tubo. La mayor parte de estas bombas tienen una precisión de $\pm 5-10\%$.

Por el contrario los inconvenientes que se señalan son otros, el importante volumen ocupado por la bomba, las presiones de trabajo reducidas a 3 bares como máximo que limitan la altura de impulsión, y fragilidad de la máquina ante la presencia de cuerpo extraños, que pueden rasgar con facilidad la membrana tubular, así como la obligatoriedad de cambiar este elemento con cierta frecuencia, debido al envejecimiento del material flexible.

Los rendimientos de las bombas peristálticas son de tipo mediano a bajo, puede manejar caudales de hasta $80\text{m}^3/\text{h}$ y presiones de hasta 16 bares, precisándose potencias relativamente elevadas entre 5 a 20 CV.

Debido a su higiene y precisión es muy utilizada en medicina y en el sector alimenticio, aunque requiere mantenimiento frecuente.



5.3.3. Bombas de Jeringa

Las bombas de jeringa consisten en un cilindro que se llena con el fluido y que es impulsado por un embolo a una determinada velocidad mediante un sistema de engranajes y un motor de paso.



Figura 7
Bomba de jeringa.

Este dispositivo puede suministrar pequeñas cantidades de fluido a velocidades tan bajas como 0,01 ml/hora, se utilizan cuando se requiere alta precisión a bajo flujo.

Para aumentar la capacidad y la continuidad de las bombas se pueden añadir más cilindros y alternamos su descarga para conseguir mejores resultados.

Especificaciones de infusión

0,1 ml/h – 150 ml/h	jeringas de 5 ml
0,1 ml/h – 300 ml/h	jeringas de 10 ml
0,1 ml/h – 600 ml/h	jeringas de 20 ml
0,1 ml/h – 900 ml/h	jeringas de 30 ml
0,1 ml/h – 1200 ml/h	jeringas de 50 ml

El rango de volumen infundido es de 0,0 ml – 9990 ml.

Pueden alcanzar presiones bastante altas y no suelen precisar mantenimiento.

Sus desventajas son la limitada capacidad del depósito y un ligero cambio de flujo a presiones altas, así como la falta de suministro de fluido en el retroceso del émbolo.

A continuación se muestran unos datos técnicos que caracterizan a este tipo de bombas.

Presión de trabajo 1000- 10000 Pa
 Temperatura de operación es de -15°C a temperatura ambiente
 Caudal va de 1.0µl/min a 90 ml/min
 Precisión es de ±1.0%

**Estos datos son orientativos, las características pueden variar según el diseño y el tamaño de la bomba.



Son utilizadas en cualquier sistema que requiera gran precisión a la hora de inyectar fluido.

5.3.4. Bombas de membrana o diafragma

La bomba de membrana o bomba de diafragma es un tipo de bomba de desplazamiento positivo (generalmente alternativo) en la que el aumento de presión se realiza por el empuje de unas paredes elásticas (membranas o diafragmas) que varían el volumen de la cámara aumentándolo y disminuyéndolo alternativamente. Unas válvulas de retención controlan que el movimiento del fluido, para que se realice de la zona de menor presión a la de mayor presión.

El sistema de accionamiento puede ser de dos tipos:

- Eléctrico; mediante un motor eléctrico.
- Neumático; mediante aire comprimido.

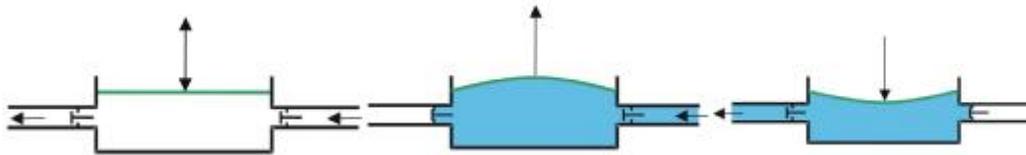


Figura 8.a

Figura 8.b

Figura 8.c

En las figuras anteriores se indican el movimiento del fluido en una bomba de membrana simple. En la figura 8.b se observa como el fluido entra en la cámara cuando la membrana asciende (aumentando el volumen), produciendo un vacío en dicha cámara. Una vez que el volumen de la cámara se ha llenado, la membrana comienza a descender, como se puede ver en la figura 8.c, creando un aumento de presión y provocando la salida del fluido.

Este tipo de bombas, también existen con doble diafragma (son más utilizadas en el mercado), las cuales funcionan bajo el mismo principio que las anteriores, pero tienen dos cámaras con un diafragma cada una, de forma que cuando una membrana disminuye el volumen de su cámara respectiva, la otra membrana aumenta el volumen de la otra cámara y viceversa. A continuación se muestra una tabla con los datos más característicos de estas bombas.

	Caudal máx.	Presión aire alimentación máx.	Altura de elevación máx.
Máximo	900 l/min.	7 bar	70 m
Mínimo	5 l/min.		

Tabla 3

Los datos de esta tabla son orientativos

Poseen ciertas ventajas frente a otros tipos de bombas, ya que no poseen cierres mecánicos ni empaquetaduras que son las principales causas de rotura de los equipos de



bombeo en condiciones severas. Estas bombas son autocebantes, es decir, no es necesario llenar la columna de aspiración de líquido para que funcionen, por lo que pueden ser utilizadas para sacar líquido de depósitos aspirando aunque la tubería de aspiración esté llena de aire inicialmente.

Debido a la resistencia a la corrosión de estas bombas y a no ser necesario cebarlas para que funcionen, estos equipos son muy utilizados en la industria para el movimiento de prácticamente cualquier líquido y en multitud de industrias como ácidos, derivados del petróleo, disolventes, pinturas, barnices, etc.

Dependiendo del rango de temperaturas en el que vaya a trabajar la máquina, se utilizan unos materiales u otros para las membranas. Los materiales más utilizados son neopreno, teflón, poliuretano y otros materiales sintéticos.

5.3.5. Bomba de engranajes

En las bombas de engranaje cilíndrico (Figura 9.a) los engranajes giran con buen ajuste dentro de la carcasa. El líquido entra a través de la tubería de succión por la parte interior de la carcasa, es ocluido en los espacios que existen entre los dientes y la carcasa y circula periféricamente hacia la parte opuesta del engranaje y finalmente es lanzado hacia el punto de descarga. El líquido no puede volver a la cámara de succión debido al estrecho ajuste de los engranajes en el centro de la bomba.

Las bombas de engranaje interno (Figura 9.b) constan de una carcasa, dentro de la cual hay un piñón que engrana con una corona dentada. La corona dentada es coaxial con la carcasa, pero el piñón, que es movido desde el exterior, está montado excéntricamente. Una media luna metálica estacionaria llena el espacio que existe entre los dos engranajes. El líquido es transportado desde la entrada hasta el orificio de descarga por ambos engranajes, ocluido entre los dientes de los engranajes y la media luna.

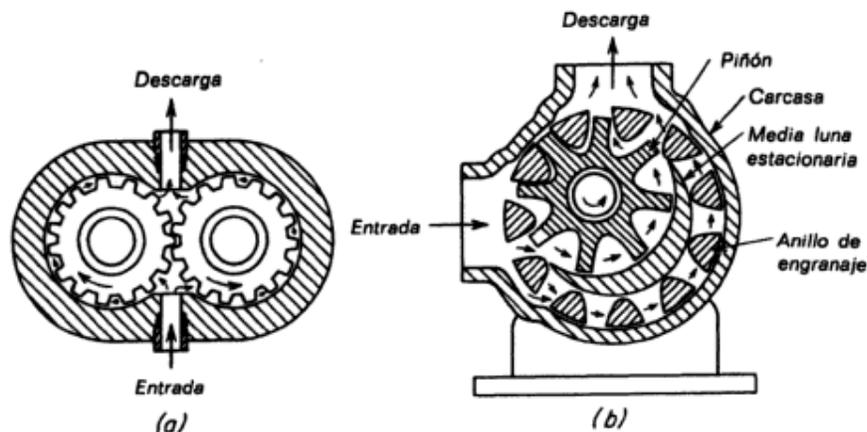


Figura 9

Bombas de engranaje: (a) Bomba de engranaje cilíndrico. (b) Bomba de engranaje interno



El volumen que la bomba envía en cada revolución se denomina cilindrada, y es igual a la suma del volumen de las cavidades que quedan entre cada dos dientes consecutivos en ambos engranajes y la carcasa externa.

Estas bombas están muy difundidas, gracias a su relativamente bajo precio y fácil mantenimiento

Las bombas de engranajes ocupan un volumen considerable pero con ellas se pueden obtener altas presiones (de hasta 175 bar) y caudales de 600 m³/h. Por ello deben estar provistas de dispositivos de seguridad contra sobrepresiones, inadmisibles en el conducto bajo presión. La descarga del fluido es casi independiente de la presión y no necesita cebado.

Las principales ventajas de las bombas de engranaje sobre la bomba alternativa consisten en que proporciona un flujo homogéneo y que puede acoplarse directamente a un motor eléctrico. Puede tratar líquidos de viscosidades muy elevadas y se utiliza mucho en la industria del petróleo para el bombeo de residuos viscosos procedentes de las plantas de destilación. Debido a que el espacio entre los dientes de los engranajes es comparativamente pequeño, la bomba no se puede utilizar con suspensiones.

Sus principales desventajas son las velocidades moderadas a las que se tienen que mover los engranajes, no llegando a superar casi nunca las 2000 rpm, para que el sistema funcione y no rompa, y que el fluido tiene que estar en contacto con los engranajes, pudiendo calentar y contaminar el fluido.

5.3.6. Bombas de tornillo.

Una bomba de tornillo es un tipo de bomba hidráulica, que esta entre las bombas volumétricas de desplazamiento positivo, pero funciona rotativamente como las centrífugas. Este tipo de bomba utiliza un tornillo helicoidal excéntrico que se mueve dentro de una camisa o cubierta, el cual hace fluir el líquido entre ambos.

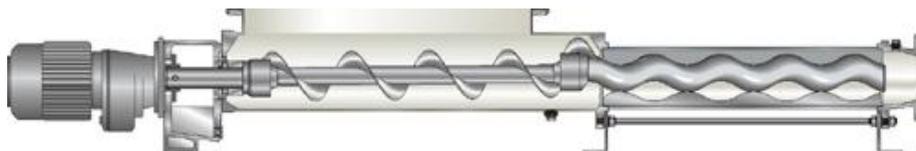


Figura 10
Vista seccionada de una bomba de tornillo sin fin.

El funcionamiento de este tipo de bombas se basa en el tornillo de Arquímedes, es una máquina utilizada para elevación de agua, harina o cereales, que consiste en que un tornillo gire dentro de un cilindro hueco, situado sobre un plano inclinado, y que permite elevar el agua situada por debajo del eje de giro. Fue inventado en el siglo III a. C. por Arquímedes, del que recibe su nombre.

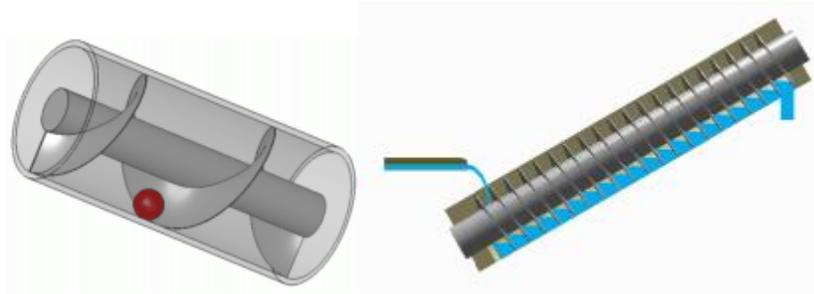


Figura 11
Esquemas de funcionamiento del tornillo de Arquímedes.

Las bombas de tornillo están indicadas para bombear fluidos viscosos, con altos contenidos en sólidos.



Figura 13
Vista seccionada de una variable de bombas de tornillo.

Las bombas de tornillo pueden estar constituidas de uno a tres tornillos roscados convenientemente, que giran en una caja fija.

Las bombas de un solo tornillo tienen un rotor en forma espiral que gira excéntricamente en un estator de hélice interna o cubierta. El rotor es de metal y la hélice es generalmente de hule blando o duro, dependiendo del material que se maneje.

Las bombas de dos y tres tornillos tienen uno o dos engranajes locos, respectivamente. El flujo se establece entre las roscas de los tornillos y a lo largo de su eje. Pueden usarse tornillos con roscas opuestas para eliminar el empuje axial en la bomba.

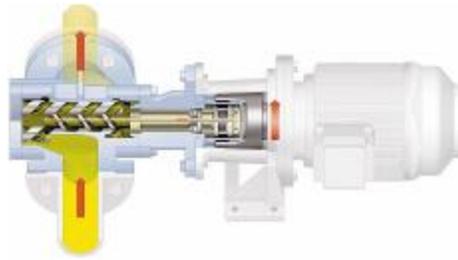


Figura 14

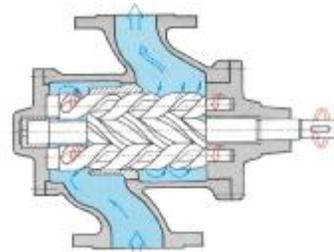


Figura 15

Otros tipos de aplicaciones de tornillo sinfín en bombas.

A continuación se muestra una tabla con los caudales y presiones de funcionamiento según su tamaño, número de etapas y régimen de funcionamiento.

TABLA DE CAUDALES Y PRESION												
TAMANO DE BOMBA	Nº DE ETAPAS	Presión máx bar	100 rpm		200 rpm		300 rpm		400 rpm		500 rpm	
			l/h	Kw								
20	1	5,86		0,037		0,074		0,111		0,15		0,18
	2	11,7	227	0,074	454	0,15	600	0,22	908	0,3	1.135	0,372
	4	23,5		0,15		0,3		0,45		0,6		0,745
30	1	5,86		0,125		0,25		0,38		0,5		0,63
	2	11,7	681	0,25	1.360	0,5	2.044	0,76	2.725	1	3.406	1,26
	4	23,5		0,5		1		1,5		2,02		2,52
40	1	5,86		0,3		0,6		0,9		1,2		1,5
	2	11,7	1.590	0,6	3.180	1,2	4.770	1,8	6.359	2,4	9.949	3
	4	23,5		1,2		2,4		3,6		4,8		6
50	1	5,86		0,58		1,17		1,75		2,34		2,9
	2	11,7	2.950	1,17	5.905	2,34	8.858	3,5	11.810	4,67	14.763	5,84
	4	23,5		2,34		4,67		7		9,35		11,7
60	1	5,86		1		2		3		4		5
	2	11,7	5.224	2	10.447	4	15.670	6	20.895	8	26.119	10
	4	23,5		4		8		12,12		16		20,2
70	1	5,86		1,6		3,2		4,8		6,4		8
	2	11,7	8.176	3,2	16.350	6,4	24.529	9,6	32.705	12,8	40.882	16
	4	23,5		6,4		12,8		19,26		25,6		32
80	1	5,86		2,4		4,8		7,1		9,6		
	2	11,7	12.265	4,8	24.529	9,6	36.794	14,3	49.058	19,16		
100	1	5,86		4,6		9,3		14		18,7		
	2	11,7	24.075	9,3	48.150	18,7	72.225	28	96.300	37,4		
113	1	5,86	33.160	6,5	66.320	13	99.480	19,5				
100/2	1	5,86	48.600	9,4	97.200	18,8	145.814	28,3				
120/2	1	5,86	77.676	15,16	155.353	30,3	233.030	45,48				
150	1	5,86		15,16		30,3		45,48				
	2	11,7	81.083	30,3	162.167	60,6	243.250	91				
200	1	5,86	191.920	35,8	383.840	71,58						

Tabla 4

5.3.7. Bombas de émbolo o pistones.

Las bombas de émbolo son del tipo volumétricas, y se emplean para el movimiento de fluidos a alta presión o fluidos de elevadas viscosidades o densidades.

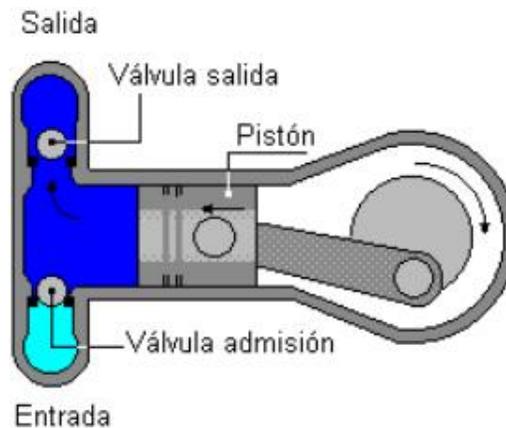


Figura 16
Esquema de funcionamiento de bomba de pistón

Las bombas de pistones están formadas por uno o varios pistones que tienen un movimiento de vaivén, durante la carrera de descenso del pistón, se abre la válvula de admisión accionada por el vacío creado por el propio pistón, mientras la de descarga se comprime contra su asiento, de esta forma se llena de líquido el espacio sobre el pistón. Luego, cuando el pistón sube, el incremento de presión cierra la válvula de admisión y empuja la de escape, abriéndola, con lo que se produce la descarga a partir de un movimiento rotativo del eje. La repetición de este ciclo de trabajo produce un bombeo pulsante de alto rendimiento.

Las bombas de embolo prácticamente no tienen límites de presiones, ni caudal (basta con construir la bomba más robusta y un motor más potente) pudiendo llegar a $5\text{m}^2/\text{s}$ se construyen hasta para presiones mayores a $5\text{MN}/\text{m}$, sus rendimientos varían de un 40 a 50% para bombas pequeñas, y desde el 70 al 90% en bombas grandes, su rendimiento volumétrico definido como la relación entre la descarga real y el volumen de barrido, es generalmente superior al 90% también.

Estas bombas disponen de varios conjuntos pistón-cilindro de forma que mientras unos pistones están aspirando líquido, otros lo están impulsando, consiguiendo así un flujo menos pulsante; siendo más continuo cuantos más pistones haya en la bomba; produciendo así un caudal continuo (Figura 17).

Como hemos comentado la eficiencia de las bombas de pistones es, en general, mayor que cualquier otro tipo, venciendo, generalmente, presiones de trabajo más elevadas que las bombas de engranajes o de paletas.

Las tolerancias muy ajustadas de estas bombas las hacen muy sensibles a la contaminación del líquido, y debido a estas tolerancias y la alta velocidad a la que puede moverse el pistón, se puede dar el fenómeno de cavitación, diciendo entonces que el líquido golpea.



Según la disposición de los pistones con relación al eje que los acciona, estas bombas pueden clasificarse en tres tipos:

- Axiales: los pistones son paralelos entre si y también paralelos al eje.
- Radiales: los pistones son perpendiculares al eje, en forma de radios.
- Transversales: los pistones, perpendiculares al eje, son accionados por bielas.

Entre sus ventajas podemos enumerar:

- Auto-cebadura* – La bomba maneja grandes flujos de aspiración muy eficientemente sin necesidad de dispositivos de cebadura automáticos.
- Medición Positiva – Cada carrera descarga un volumen positivo medido lo cual permite que se pueda establecer un ciclo de operación fijo dentro de la planta, este volumen puede ser cambiado mediante ajuste de la longitud de carrera.

A velocidad de operación baja, permiten que esta bomba pueda manipular fragmentos atrapados de sólidos con mucho menos probabilidad de sufrir daño interno que las bombas centrifugas.

*Se llama cebado a la operación que consiste en extraer el aire de la cañería de aspiración y de la bomba para que quede llena con líquido.

Las desventajas de este sistema son:

- A altas velocidades y debido a las tolerancias muy ajustadas de estas bombas las hacen muy sensibles a la contaminación del líquido.
- Flujo pulsante, debido al proceso de llenado de la bomba.
- Cavitación, debido a las presiones generadas.

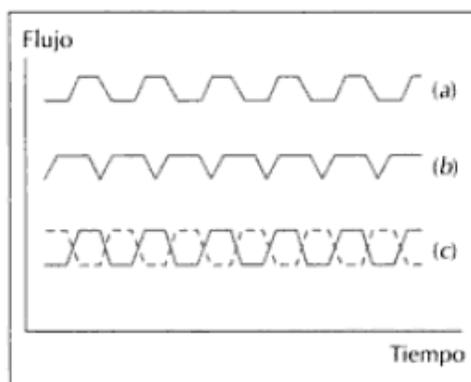


Figura 17

Pulsaciones debidas al flujo de una bomba de embolo. (a)Bomba de pistón simple con un flujo de llenado lento. (b) Bomba de pistón simple con flujo de llenado rápido. (c) Alternancia entre dos bombas de pistón.



5.3.7.1. Bombas de embolo de doble efecto.

La bombas de émbolo de doble efecto tiene las mismas características que las bombas de émbolo de simple efecto, con la diferencia que estas utilizan el volumen situado a ambos lados del pistón.

La descarga de las bombas de doble efecto es análoga en durante la carrera de ida y de vuelta. Sin embargo, en muchos casos el área de las sección trasversal de la varilla del embolo, puede ser importante en comparación con la del émbolo mismo y el volumen descargado durante la carrera de retorno será menor que el correspondiente con la carrera de ida.

Al igual que en las bombas de simple efecto la presión en la descarga de la bomba está influenciada por:

- Presión estática en el punto de descarga.
- Presión que se requiere para superar las pérdidas por fricción.
- Presión para acelerar el fluido al comienzo de la carrera de descarga.

5.4. Conclusiones.

Después de un observar las principales características de las bombas existentes en el haber, y para las especificaciones requeridas para conseguir un flujo de fluido, que sigue los patrones de una onda generada por ordenador, para simular el ciclo cardiaco, podemos concluir que:

Las bombas centrífugas: Cumplen muchas de las especificaciones requeridas debido a que su caudal es variable según a la velocidad a la que giremos el rotor, pero posee una gran desventaja y consta en que el fluido tarda en modificar su inercia demasiado tiempo respecto a la del rotor debido a la transmisión que existe entre estos dos elementos, por tanto desecharemos este tipo de bombas para nuestro objetivo.

Las bombas volumétricas: Existen muchos tipos de bombas volumétricas como ya hemos explicado estas se basan en un cambio del volumen de la zona de donde se encuentra el fluido, debido a su gran variedad veremos cuales se acercan más a las especificaciones mentadas.

Bombas de paletas: Son aptas para nuestras especificaciones, con la pequeña pega que el fluido al estar en contacto con el fluido y el rozamiento que existe entre las paletas y las paletas podrían calentar el fluido.

Bombas peristálticas: Las bombas peristálticas tiene la gran ventaja de no estar en contacto con el fluido, además de poder regular su caudal con gran exactitud, son idóneas para nuestra aplicación.

Bombas de jeringa: Son perfectas para la transmisión de fluido a la velocidad que deseamos durante su recorrido, pero tienen el problema que hay que esperar un tiempo cuando llega al final de su carrera, porque hay que esperar a que se rellene el depósito.



Bombas de diafragma y de engranajes: Este tipo de bombas no son adecuadas para nuestro propósito debido a que este tipo de bomba no tiene mecanismos para el control exacto de la velocidad del fluido.

Bombas de tornillo: Son aptas para nuestras especificaciones, aunque el fluido está en contacto con los engranajes y su rango de trabajo suele ser a mayores revoluciones con lo que no se obtendrá el rendimiento deseado.

Bombas de embolo o pistón: Tiene las mismas ventajas y desventajas que las bombas de jeringa, pero puede trabajar a regímenes más altos de velocidad y presión. En caso de ser de doble efecto supliríamos esa desventaja de tener que esperar para a la recarga de la cámara, aunque no podemos evitar una pequeña pérdida del caudal al final de carrera.



6. Estudio teórico del perfil de velocidades cercano a la pared del cilindro.

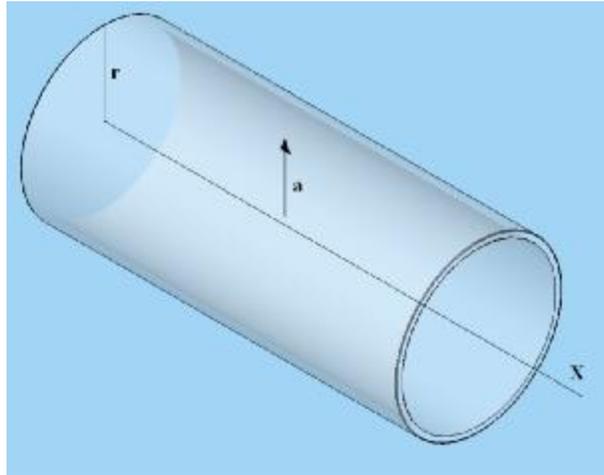


Figura 1
Sistema de referencia cilíndrico.

Haremos este estudio en coordenadas polares.

Ecuación de cantidad de movimiento según x en coordenadas polares y con simetría axial es:

$$\rho_o \frac{\partial u'}{\partial t'} = -\Delta p'_x + \frac{\mu_o}{r'} \frac{\partial}{\partial r'} \left(r' \frac{\partial u'}{\partial r'} \right)$$

Condiciones de contorno:

- Simetría axial: $\frac{\partial u'}{\partial r'} = 0$ $r' = 0$
- No deslizamiento en la pared: $u' = 0$ $r' = a$

Una vez definidas las condiciones de contorno vamos a adimensionalizar la ecuación, sabemos que la densidad (ρ_o) y la viscosidad (μ_o) son constantes, ya que consideramos que el líquido es isotrópico. Como va a ser periódico el tiempo característico (t_c) será $t_c \sim \frac{1}{\omega}$, la velocidad $u = u_o = a \cdot \omega = [L] \cdot [T]^{-1}$ y $r = a$. Por lo que la ecuación de movimiento adimensionalizada, será:

$$\rho_o u_o \omega \frac{\partial u}{\partial t} = -\Delta p'_x + \frac{\mu_o}{a^2} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u'}{\partial r} \right)$$

Como $\frac{v_o}{a^2 \omega}$ es el número de Stokes (St), $v_o = \frac{\mu_o}{\rho_o}$, $\hat{p}_s = \frac{p_s}{\rho_o u_o \omega} = \frac{p_s}{\rho_o a \omega^2}$ y $\Delta p_x = -p_s \cos \omega t$



Con lo que nos queda:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \hat{p}_e \cos \omega t + St \cdot \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right)$$

Se puede solucionar por separación de variables de manera que la solución general viene dada por $u = U(r) \cdot e^{i\omega t} \rightarrow e^{i\omega t} = \cos \omega t + i \sin \omega t$.

Ecuación de Bessel de primera especie y orden 0:

Solución general:

$$u = U(r) \cdot e^{i\omega t} = i \left[\frac{J_0 \left(\frac{i^{3/2} r}{\sqrt{St}} \right)}{J_0 \left(\frac{i^{3/2}}{\sqrt{St}} \right)} - 1 \right] e^{i\omega t}$$

Este cálculo se puede ver en el libro “**The Navier-Stokes equations: a classification of flows and exact solutions**” de P.G. Drazin, N. Riley.

Ahora estudiaremos para el caso en que $St \ll 1$ ya que estamos en la pared con lo que despreciaremos los términos viscosos.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \hat{p}_e \cos \omega t \rightarrow \frac{\partial u}{\partial t} = \hat{p}_e \cos \omega t \rightarrow u = \frac{\hat{p}_e}{\omega} \sin \omega t + k$$

Si $t = 0$ y $u = 0$ implica que $u = \frac{\hat{p}_e}{\omega} \sin \omega t$

La representación gráfica de la ecuación la hemos simulado con un $St = 0,01$, en Matlab obteniendo:

$$\text{De } t = \frac{\pi}{2\omega} \text{ a } t = \frac{\pi}{\omega}$$

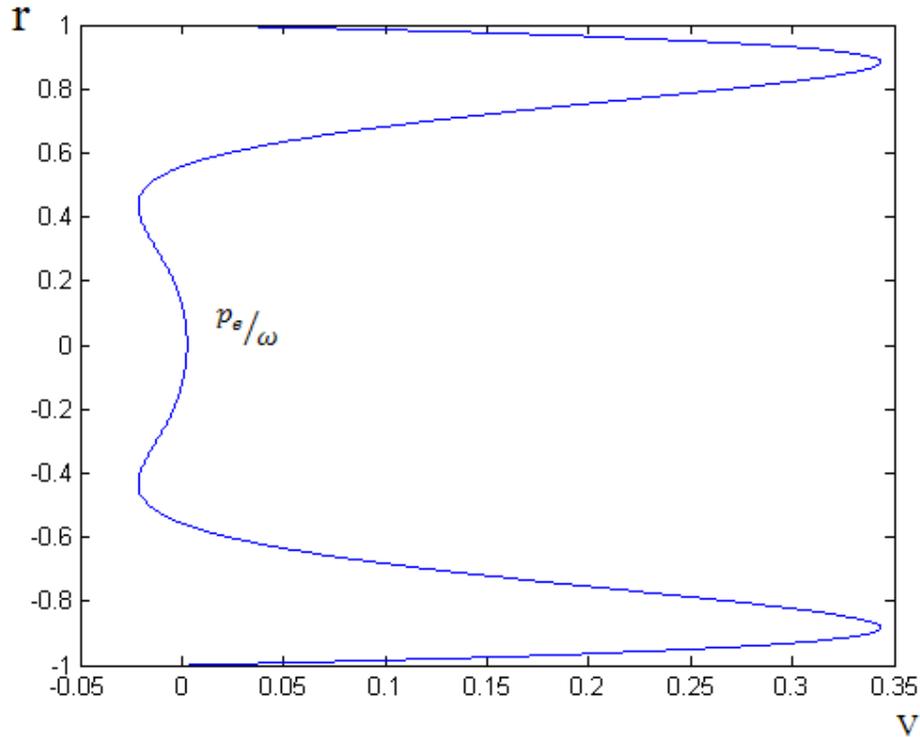


Figura 2
Gráfica r-v del perfil de velocidades

Como el perfil de velocidad no cumple la condición de no deslizamiento, esto quiere decir que los términos viscosos sólo son importantes en una zona de espesor pequeño cercano a la pared.

Por la estimación de órdenes de magnitud el espesor de la zona donde los términos viscosos son importantes es:

$$\frac{\partial u}{\partial t} \sim 1 \rightarrow \frac{u_c}{t_c} \sim 1$$

$$St \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) \sim \frac{1}{1} \frac{1}{\delta} \frac{1}{\delta} \sim \frac{St}{\delta^2}$$

$$1 \sim \frac{St}{\delta^2} \rightarrow \delta \sim \sqrt{St}$$

Con las variables obtenidas rescalamos la ecuación

$$\eta = \frac{r-1}{\sqrt{St}} \quad \text{y} \quad \frac{\partial}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial r} = \frac{1}{\sqrt{St}} \cdot \frac{\partial}{\partial \eta}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \hat{p}_e \cos \omega t + St \cdot \frac{1}{(\eta \cdot \sqrt{St} + 1)} \cdot \frac{1}{\sqrt{St}} \cdot \frac{\partial}{\partial \eta} \left((\eta \cdot \sqrt{St} + 1) \frac{1}{\sqrt{St}} \cdot \frac{\partial}{\partial \eta} \right)$$



La ecuación de la capa viscosa se reduce a...

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \hat{p}_e \cos \omega t + \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2}$$

Con las condiciones de contorno:

- No deslizamiento $\eta = 0 \quad u = 0$
- Empalme con el perfil uniforme de velocidades $\eta \rightarrow -\infty; \quad \hat{p}_e \sin \omega t$

Como en el anterior caso vamos a separar las variables mediante:

$$U_{\eta\eta} = \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} \quad \text{y} \quad u = U(\eta) \cdot \hat{p}_e \cdot e^{i\omega t}$$

$$i \cdot \omega \cdot U \cdot \hat{p}_e \cdot e^{i\omega t} = \hat{p}_e \cdot e^{i\omega t} + U_{\eta\eta} \cdot \hat{p}_e \cdot e^{i\omega t}$$

$$i \cdot \omega \cdot U = 1 + U_{\eta\eta} \rightarrow \text{Si } \omega = 1 \rightarrow i \cdot U = 1 + U_{\eta\eta}$$

De lo que deducimos que:

- $\eta = 0 \quad U = 0$
- $\eta \rightarrow -\infty \quad U \rightarrow -i$

Y como ecuación final de la aproximación con el reescalado tenemos que:

$$u = e^{\frac{\sqrt{2}}{2}\eta} \cos\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\eta\right) \cos t + \left(1 - e^{\frac{\sqrt{2}}{2}\eta} \cdot \sin\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\eta\right)\right) \sin t$$

Este cálculo se puede ver en el libro “The Navier-Stokes equations: a classification of flows and exact solutions” mentado anteriormente.



En esta gráfica generada en Matlab con un numero de $St = 0,001$ y reescalada.
 $\eta \in [0, -10]$

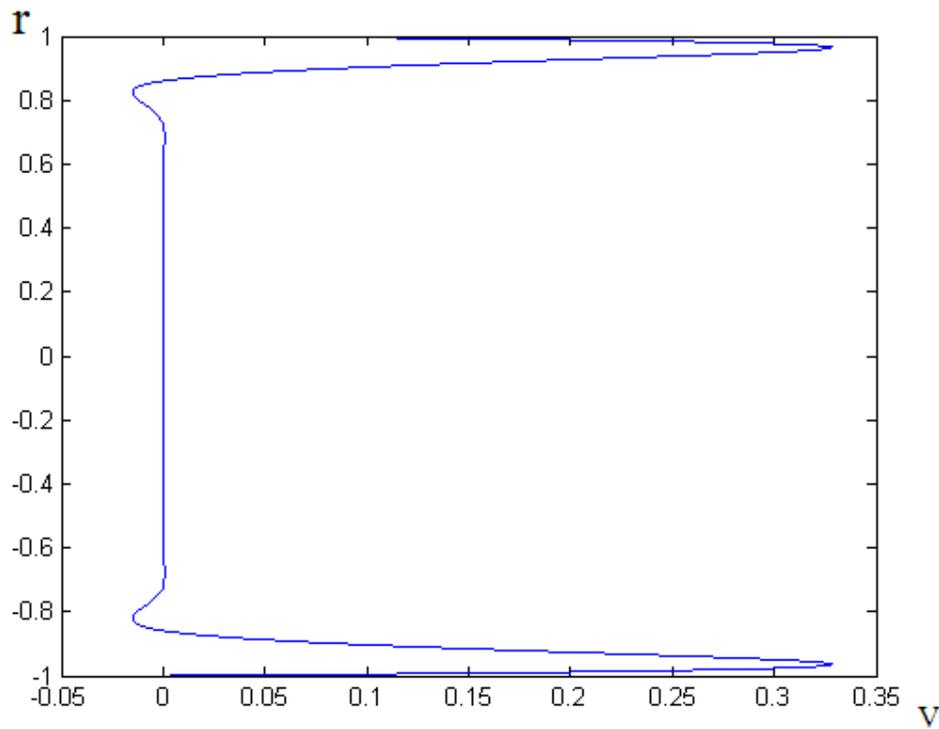


Figura 3

Gráfica r-v del perfil de velocidades para el reescalado con un St de 0,001



7. Descripción de los componentes

7.1. Introducción

A continuación haremos la descripción de cada uno de sus componentes, sirviendo así de guía para poder comprender el funcionamiento de la bomba, en ella describiremos sus formas, materiales y características principales.

Esta descripción seguirá el siguiente esquema:

Sistema principal: Es la zona principal de la bomba, todas sus partes están pensadas para el alojamiento o contacto con fluidos, es la encargada de desplazar y contener el líquido.

- Embolo.
- Tapa exterior e interior.
- Cilindro.
- Guías.

Reutilización, modificación de componentes y elementos de adaptación: Como ya hemos comentado antes, este proyecto es la mejora de uno anterior, así pues, hemos modificado y mejorado partes de la anterior bomba, para su reutilización y adaptación a la actual. De esta manera abaratamos los costes de la misma.

- Tornillo sin fin.
- Adaptador del rodamiento.
- Adaptador del eje.
- Transmisores 1 y 2.
- Motor eléctrico.

Sistema estructural: Es el que da rigidez a la bomba, sobre este sistema se construye todo lo demás, sirve para dar una cohesión a la maquina y que resista los esfuerzos.

- Tensores.
- Tapa motor.
- Estructura interior
- Sistema de enganche “Sándwich”

Sistema eléctrico: Como indica su nombre es la parte encargada de todo lo que tiene que ver con la electricidad, es decir, todo el sistema de control por ordenador y periféricos necesarios.

- Motor eléctrico
- Detectores fin de carrera



7.2. Sistema principal

7.2.1. Émbolo

La función de este componente es primordial para el funcionamiento de la bomba, consiste en el desplazamiento, hacia ambos lados en la dirección del eje, del fluido que queremos bombear para realizar la simulación.

El émbolo a su vez esta compuesto de varias piezas que pasaremos a describir a continuación.

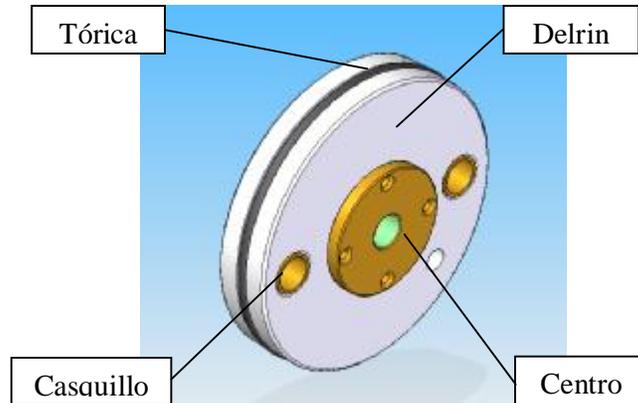


Figura 1
Diseño del pistón

7.2.1.1. Delrin

Es el esqueleto del émbolo y la que le da la forma.

Esta pieza esta construida en un material plástico llamado delrin. Hemos seleccionado este material, por sus buenas propiedades al deslizamiento y su gran estabilidad dimensional, que fue uno de los problemas del diseño anterior, ya que el delrin tiene un porcentaje de absorción de humedad máxima en agua, bastante bajo, alrededor de 0,9 %, a diferencia del nylon que tiene un porcentaje de absorción de humedad máxima en agua del 9%, es decir el delrin no se dilata por la absorción de humedad, como ocurre con el nylon.



En la siguiente tabla se muestra las propiedades del delrin.

	Unidad	Valores Medios
Peso específico	gr./cm ³	1,42
Resistencia a la tracción	Kg./cm ²	705
Alargamiento a la rotura	%	75
Resistencia al choque con entallada	Kg./cm ²	10 – 12,5
Módulo de elasticidad	Kg./cm ²	38000
Coefficiente de fricción	-	0,1 – 0,3
Resistencia a la flexión	Kg./cm ²	1000
Temperatura de fusión	°C	185
Coefficiente de dilatación lineal	°C	8·10 ⁻⁵
Coefficiente de conducción térmica	Kcal./mh °C	0,22
Calor específico	Kcal./mh °C	0,35
Temperatura máxima de uso en forma continua sin carga	°C	90
Absorción de humedad máxima en agua	%	0,9
Constante dieléctrica	10 ⁵ Hz	3,7
Factor de pérdida dieléctrica	10 ⁵ Hz	0,003
Resistencia al paso de la chispa	Kv/mm	23

Tabla 1

7.2.1.2. Centro

El centro es la pieza que va acoplada el tornillo sin fin, es decir, que a través de ella el émbolo recibe el movimiento.

La función de esta pieza consiste en transformar el movimiento rotatorio del motor, que viene transmitido por el tornillo sin fin, en un movimiento lineal a lo largo del eje, que nos permite trasladar el fluido de un extremo a otro de la camisa, el material empleado en este caso es latón.

La pieza esta formada por dos partes, con este diseño conseguimos realizar un “sándwich” al Delrin, evitando que ambas piezas se separe y el funcionamiento sea correcto. Para evitar que el Delrin gire y realiza esfuerzos sobre las guías, una de las partes del Centro se atornilla al Delrin a través de 4 tornillos.

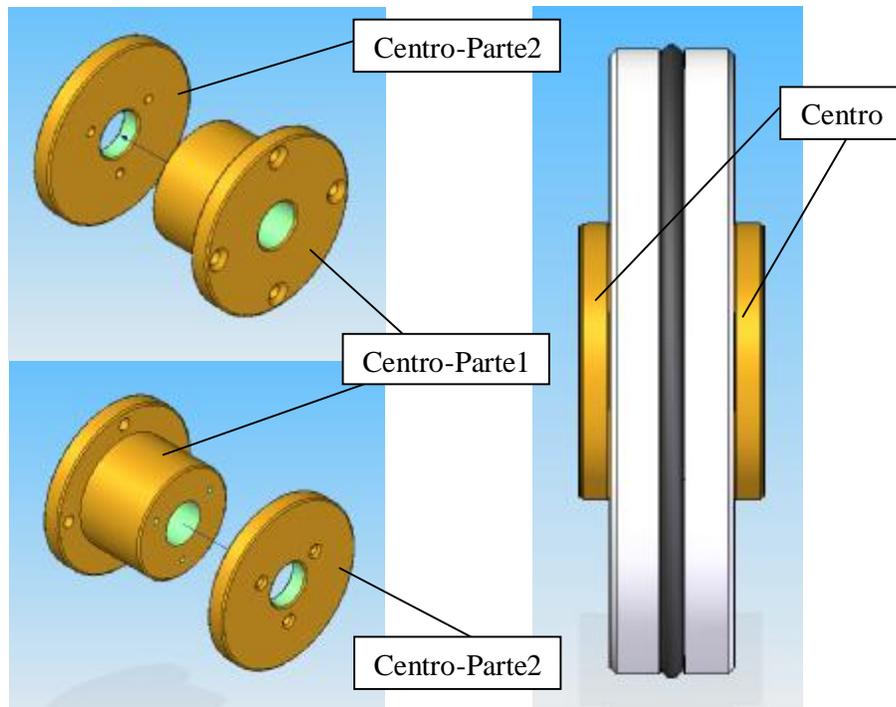


Figura 2
Detalle del pistón

Latón

El latón, es una aleación de Cobre y Zinc, las proporciones de sus elementos pueden ser variadas para crear un rango de latones con propiedades variables, influye en las características mecánicas, la fusibilidad y la capacidad de conformación por fundición, forja, estampación y mecanizado.

En general, la densidad del latón ronda entre $8,4\text{g} / \text{cm}^3$ y $8,7\text{g} / \text{cm}^3$, su elevada resistencia a la corrosión y al desgaste lo hacen perfecto para su aplicación.

7.2.1.3. Casquillo

Los casquillos utilizados para el émbolo, son piezas comerciales obtenidas a través del proveedor.

Los casquillos mencionados se caracterizan por ser de cobre sinterizado y tener una calidad h7, para garantizar un gran ajuste y un deslizamiento suave con las guías por las que se desplaza el émbolo.



7.2.2. Tapa exterior y tapa interior

Estas piezas, construidas en PVC rígido, están a caballo entre el sistema que genera el movimiento del pistón y la estructura que da rigidez a la bomba. Las tapas delimitan y hermetizan el volumen de la cámara de impulsión, por ello es que las tapas son piezas de gran complejidad, ya que tiene que ajustarse a todas las tolerancias de los dos sistemas, además de ser la zona donde se ensamblan, mediante unión mecánica sensores, el anillo para encerrar la tórica con el cilindro de vidrio, sujetar las guías y las salidas/entradas del fluido.

A la hora de diseñarlas hemos buscado la máxima simetría entre la tapa interior y exterior, pero debido a su funcionalidad, distan bastante de ser simétricas. La tapa interior (la denominamos interior debido a que está dentro de la bomba y no es muy accesible) se encarga de soportar el conjunto de adaptadores al eje, la tapa exterior (de fácil acceso) se encarga de apoyar las guías y el eje por medio de casquillos que van insertados en la tapa.

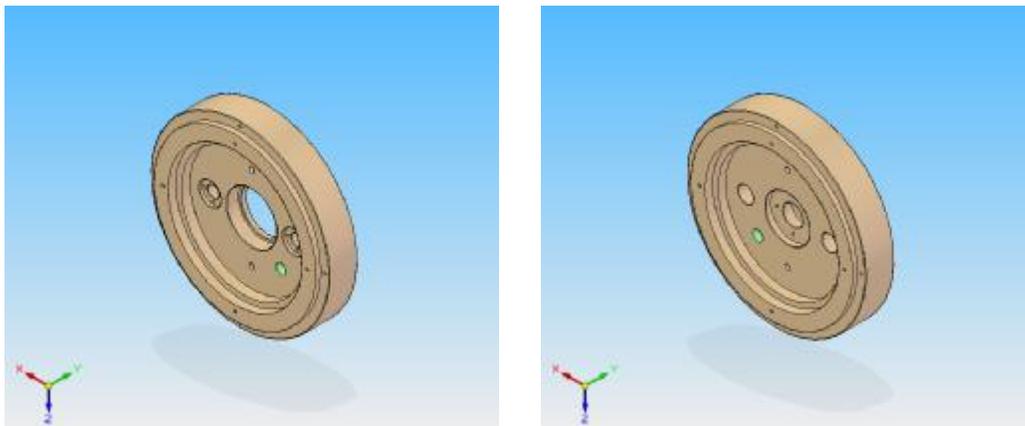
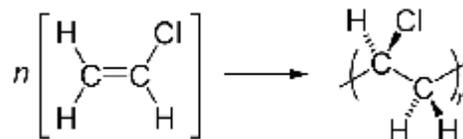


Figura 3

En la imagen podemos ver a la izquierda la tapa interior y a la derecha la tapa exterior

PVC

El Policloruro de Vinilo o PVC (del inglés Polyvinyl Chloride) es un polímero termoplástico.



Se presenta como un material blanco que comienza a reblandecer alrededor de los 80°C y se descompone sobre 140°C. Cabe mencionar que es un polímero por adición y además una resina que resulta de la polimerización del cloruro de vinilo o cloroetileno.

Tiene una muy buena resistencia eléctrica y a la llama. El átomo de cloro enlazado a cada átomo de carbono le confiere características amorfas principalmente e impiden su recristalización, la alta cohesión entre moléculas y cadenas poliméricas del PVC, esto se debe principalmente a los momentos dipolares fuertes originados por los átomos de cloro, los cuales a su vez hace que repelan las moléculas con igual carga, creando



repulsiones electrostáticas que reducen la flexibilidad de las cadenas poliméricas, esta dificultad en la conformación estructural.

En la industria existen dos tipos:

- Rígido: para envases, ventanas, tuberías, las cuales han reemplazado en gran medida al hierro (que se oxida más fácilmente).
- Flexible: cables, juguetes, calzados, pavimentos, recubrimientos, techos tensados...

Es dúctil y tenaz; presenta estabilidad dimensional y resistencia ambiental. Además, es reciclable por varios métodos. Todo esto junto con su bajo precio y facilidad de mecanización han hecho que escojamos este producto.

7.2.3. Cilindro

Esta pieza consiste en un cilindro hueco de vidrio borosilicatado, es la pieza principal de la bomba, ya que esta contiene el fluido y determina el rendimiento de la bomba que es directamente proporcional a su ajuste con el pistón.

La razón de hacerlo de vidrio en vez de acero inoxidable, es que nos interesaba ver el comportamiento del fluido dentro de la bomba.

En el proyecto anterior el cilindro se construyó de metacrilato con un espesor de 3mm, las primera pruebas realizadas la bomba anterior funcionaba correctamente, pero el metacrilato es un materia con alta porosidad con lo que el fluido entro en el material y lo hinchó, esto provocó que el embolo se atorara y el motor no pudiera superar el par necesario para mover el pistón. Así pues la elección de este material es resultado de la prueba y error comentada, pero debido a la fragilidad del vidrio, hemos aumentado el espesor del vidrio a 5 mm para hacerlo más resistente a pequeños impactos producidos por la vibración interna generada en el avance del pistón y para evitar la rotura en caso de sobrepresiones internas.

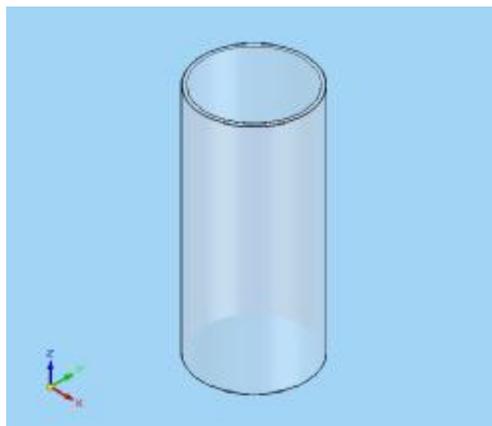


Figura 4
Diseño del cilindro



Vidrio borosilicatado.

Vidrio borosilicatado es un tipo particular de vidrio, más conocido con los nombres comerciales de Pyrex, Kimax o Endural.

El vidrio borosilicatado tiene un coeficiente de dilatación de aproximadamente un tercio del vidrio común. Aunque esto lo hace más resistente que otros vidrios al choque térmico, también puede rajarse o quebrarse al someterse a variaciones rápidas de temperatura (fatiga térmica).

Su temperatura de trabajo ronda entre los 20°C y los 200°C, su coeficiente de dilatación es $3,3 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ y su calor específico a 20°C es de 750 J/Kg°C

El vidrio borosilicatado tiene una densidad de 2,23 g/cm³ inferior a la del vidrio común (2,57 g/cm³).

Además del silicio, el carbonato de sodio y el carbonato de calcio usado tradicionalmente en la fabricación de vidrio, el boro es usado en la manufactura de este vidrio. La composición de nuestro material es: 80% sílice (SiO₂), 13% óxido de boro (B₂O₃), 4,5% óxido sódico (Na₂O), 2% de Al₂O₃, y 0,5% de K₂O.

7.2.4. Guías

Debido a las vibraciones y para evitar posibles errores hemos puesto unas guías que acompañen el movimiento del pistón, estas son al igual que los casquillos que se encuentran en el pistón, de calidad H7 deslizante, es decir que tienen una tolerancia de décimas de milímetro.

El material empleado es de acero inoxidable 311.

Las guías se apoyan en las tapas, en cavidades creadas especialmente para las guías, estas cavidades carecen de juego para evitar posibles descentramientos y vibraciones, es muy importante la exactitud del paralelismo entre guías ya que si hay algún tipo de error, ya sea de montaje o de cálculo en la situación de las cavidades generarían una interferencia que evitara el movimiento del pistón, es por ello que la excentricidad entre centros de los distintos diámetros de la guía tiene un error de 0,03mm.



Figura 5
Diseño de guías



7.3. Reutilización, modificación de componentes y elementos de adaptación.

Debido a su complejidad y buen funcionamiento demostrado en el anterior proyecto, hemos decidido volver a hacer uso de algunos componentes que pertenecían a la anterior bomba, estos componentes se centran en la zona cercana al motor. Pero debido a que nuestro diseño es distinto, la modificación de algunas piezas ha sido necesaria, al igual que la creación de piezas que sirvan de unión de los dos diseños.

7.3.1. Elementos reutilizados:

Estos elementos no han sido retocados y lo componen; el adaptador del rodamiento, adaptador del motor, transmisores del movimiento, motor eléctrico y rodamiento:

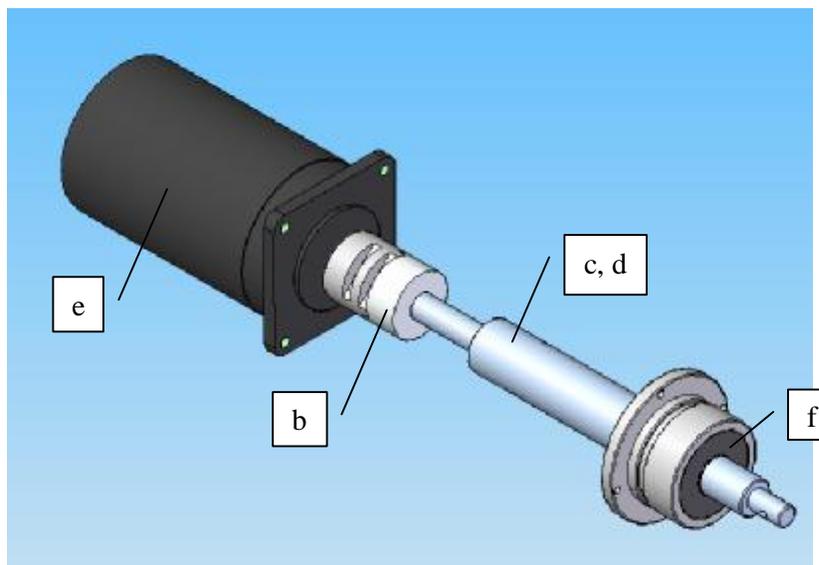


Figura 6

Visualizamos los elementos: adaptador del rodamiento(a), adaptador del motor (b), transmisores del movimiento 1 y 2 (c y d), motor eléctrico (e) y rodamiento (f).

7.3.2. Elementos modificados:

Hemos tenido que hacer algunos cambios en la geometría de estas piezas, este es el caso del tornillo sin fin y de los sensores en el pistón.

- Tornillo sin fin: Acortamos su longitud, para poder adaptarla a la longitud de nuestra bomba, y mecanizamos el extremo libre para que se encajara de manera más adecuada a la sufridera de la tapa. El paso es de 2 mm y su diámetro exterior es de métrica 14.
- Sensores del pistón: hemos tenido que recortar la longitud de la rosca ya que nuestro pistón es más estrecho y si no habría interferencia, además debido a problemas de asimetría, en el volumen a los lados del pistón del anterior proyecto, estos sensores eran asimétricos, nosotros hemos solventado el problema tal y como explicaremos en el apartado del adaptador del eje.

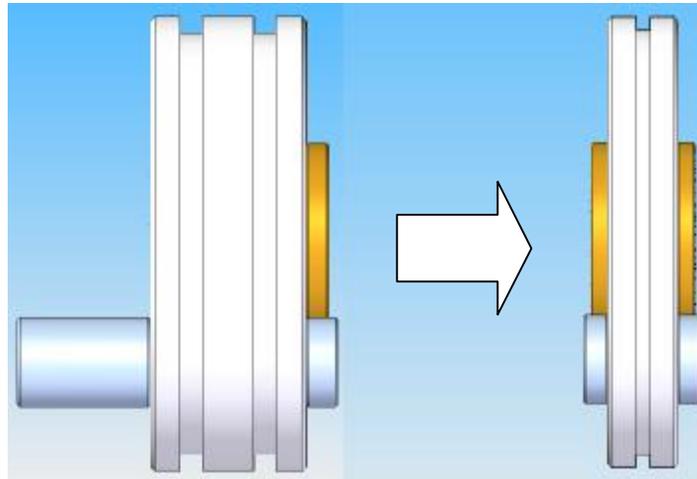


Figura 7

En la izquierda vemos el antiguo émbolo y a la derecha vemos el nuevo émbolo.

7.3.3. Elementos de adaptación

Por último aquellos elementos que nos sirven para encajar los antiguos de forma apropiada.

- Adaptador del eje: Esta pieza surge de la necesidad de aumentar la carrera del embolo, debido a la unión anterior que hemos reaprovechado entre el motor y el eje, el anterior pistón tenía limitada su carrera en la unión entre el tornillo sin fin y los transmisores de movimiento (mirar figura 8), es por eso que los sensores en el pistón eran más largos en un lado que en otro, con el adaptador del eje hemos movido todo el sistema de transmisión para que el tornillo sin fin comience a pocos milímetros de la tapa.

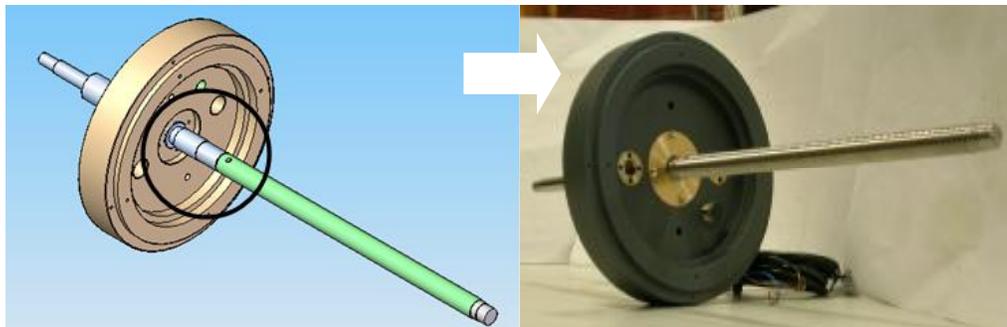


Figura 8

La zona delimitada por el círculo en la imagen de la izquierda es la que penetraba en la zona de trabajo del émbolo, a la derecha podemos ver la bomba tal y como la hemos construido, se puede apreciar que el tornillo sin fin se encuentra muy cercano a la tapa



7.4. Sistema estructural

7.4.1. Tensores

Los tensores están diseñados para darle rigidez a la estructura y para lograr el cierre de la bomba simulando un “sándwich”. También hemos tenido en cuenta la disminución del peso con respecto al diseño anterior, ya que hemos sustituido las paredes laterales por los tensores, además este sistema nos da mayor accesibilidad y visibilidad a cualquier componente de la bomba sin tener que desmontarla.

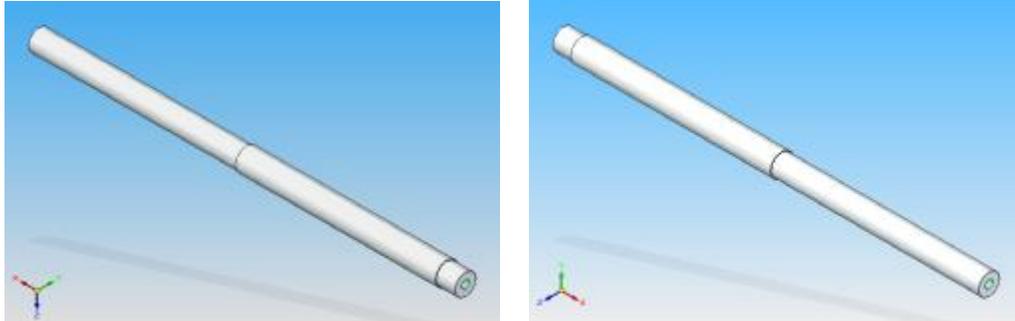


Figura 9
Diseño de tensores desde dos perspectivas distintas

7.4.2. Tapa motor y Estructura-interior

Estos componentes están diseñados para separar los elementos eléctricos de la zona de la bomba donde hay fluidos, para evitar posibles contactos. Este componente está colocado a una distancia adecuada para que sea posible el acceso a la zona de transmisión del movimiento y manipularla en caso de ser necesario.

Son de aluminio, seleccionamos este material porque buscábamos robustez en la estructura pero sin aumentar demasiado su peso.

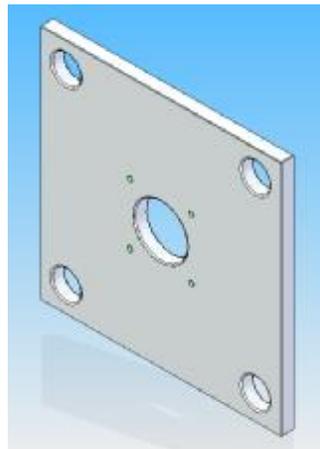


Figura 10
Diseño de estructura



7.4.3. Sistema de enganche “Sándwich”

Este sistema de enganche se repite en varias zonas de la bomba, consiste en un apriete por ambos lados de una pieza, nos da la ventaja de evitar cualquier movimiento de la pieza ocluida, ya que eliminamos los seis grados de libertad posibles en ella, además nos permite jugar un poco con el ajuste y simplifica el montaje debido a la simplicidad de las piezas que lo componen.

He aquí algunos ejemplos de este agarre:

Sistema estructura interior-tapa-cierre estructura.

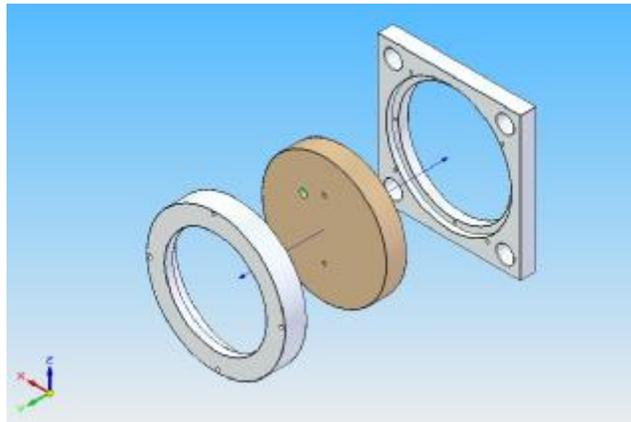


Figura 11

Podemos ver como la tapa queda ocluida en el interior de las otras dos piezas, para evitar rotaciones la tapa está atornillada a la estructura interior.

Sistema tapas-cilindro-tensores.

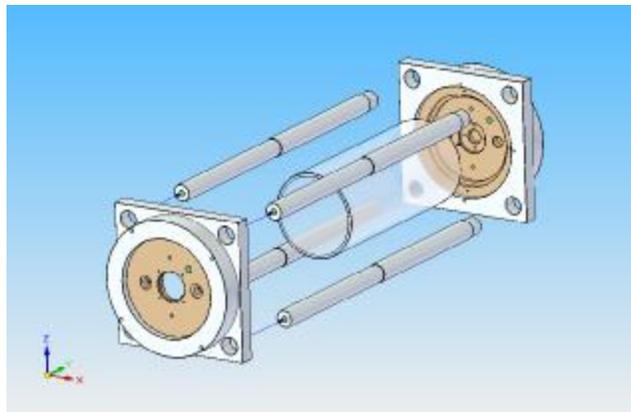


Figura 12

Este sistema difiere del anterior en que entran en juegos otras piezas parte de las mentadas, los tensores soportan toda la carga longitudinal además de los torses protegiendo al cilindro que es más frágil.



7.5. Sistema eléctrico

7.5.1. Motor eléctrico

El motor es el componente eléctrico más importante de la bomba, ya que genera el movimiento de la misma. Su función consiste en crear el par suficiente para mover de forma solidaria al tornillo sin fin y este a su vez transmite este movimiento rotatorio al émbolo, dándole el movimiento lineal deseado, gracias al diseño de la parte central del émbolo.

Como lo que nos interesa es tener un fácil control de la posición, par y velocidad, para poder realizar la simulación del pulso cardiaco, utilizaremos un motor de corriente continua.

Dentro de los motores de corriente continua nos centraremos en los motores que utilizan electrónica, ya que todo nuestro sistema eléctrico está controlado por un ordenador, con un sistema operativo con la función “real time”. En esta clasificación encontramos tres tipos de motores:

- Motor sin núcleo: Son motores de baja inercia para arranques y paradas cortos.
- Servomotor: Son los que tienen un eje que se puede llevar a la posición angular deseada, simplemente enviándole una señal codificada, manteniéndose en dicha posición hasta que cambiamos la señal.
- Motor paso a paso: Es el tipo de motor que utilizaremos, debido que es capaz de avanzar los grados que le indiquemos, pudiendo así recrear el impulso cardiaco.

7.5.1.1. Motor paso a paso (Motor PaP)

El motor paso a paso es un dispositivo electromecánico que convierte una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, dependiendo de las características constructivas del motor este paso puede ser desde $0,9^\circ$ hasta 90° .

Además, variando la frecuencia con la que se aplican los pulsos, también estaremos variando la velocidad con que se mueve el motor, lo que nos permite realizar un control de velocidad.

Por último si invertimos la secuencia de los pulsos de alimentación aplicados a las bobinas, estaremos realizando una inversión en el sentido de giro del motor.

En resumen el motor paso a paso presenta una serie de ventajas entre las que destacar el control de la posición, la velocidad y el sentido, dando una alta precisión y repetitividad en cuanto al posicionamiento.

En cuanto a sus desventajas presentan una velocidad angular limitada. Dicha limitación surge al realizar un paso, ya que el motor requiere un tiempo para alcanzar la posición de equilibrio. Si dicho tiempo no se respeta el motor puede no encontrar nunca esa posición de equilibrio y perderíamos el control sobre él.



7.5.1.2. Tipos de Motores paso a paso.

Hay dos tipos básicos de motor paso a paso, los bipolares que se componen de dos bobinas y los unipolares que tienen cuatro bobinas.

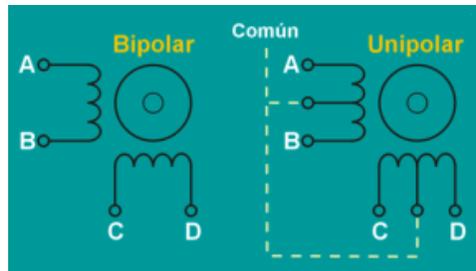


Figura 13

En la imagen de la izquierda podemos ver el esquema de un motor bipolar y a la derecha el de uno unipolar.

7.5.1.2.1. Motores Unipolares

En este caso el estator está formado por dos bobinas con tomas intermedias, lo que equivale a cuatro bobinas. El motor unipolar normalmente dispone de 5 o 6 cables dependiendo si el común está unido internamente o no, para controlar este tipo de motores existen tres métodos con sus correspondientes secuencias de encendido de bobinas.

Paso simple: Esta secuencia de pasos es la más simple de todas y consiste en activar cada bobina una a una y por separado, con esta secuencia de encendido de bobinas no se obtiene mucha fuerza ya que solo es una bobina cada vez la que arrastra y sujeta el rotor del eje del motor.



Paso	A	B	C	D
1	1	0	0	0
2	0	1	0	0
3	0	0	1	0
4	0	0	0	1

Tabla 2

Esquema de funcionamiento de un motor unipolar de paso simple.

Paso doble: Con el paso doble activamos las bobinas de dos en dos con lo que hacemos un campo magnético más potente que atraerá con mas fuerza y retendrá el rotor del motor en el sitio. Los pasos también serán algo mas bruscos debidos a que la acción del campo magnético es más poderosa que en la secuencia anterior.

Paso	A	B	C	D
1	1	1	0	0
2	0	1	1	0
3	0	0	1	1
4	1	0	0	1

Tabla 3

Esquema de funcionamiento de un motor unipolar de paso doble.



Medio Paso:

Combinando los dos tipos de secuencias anteriores podemos hacer moverse al motor en pasos más pequeños y precisos y así pues tenemos el doble de pasos de movimiento para el recorrido total de 360° del motor.

7.5.1.2.2. Motores Bipolares

Este tipo de motor lleva dos bobinados independientes el uno del otro, para controlar este motor se necesita invertir la polaridad de cada una de las bobinas en la secuencia adecuada. Cada inversión en la polaridad provoca el movimiento del eje, avanzando este un paso, la dirección de giro se corresponde con la dirección de la secuencia de pasos.

Paso	A	B	C	D
1	+Vcc	Gnd	+Vcc	Gnd
2	+Vcc	Gnd	Gnd	+Vcc
3	Gnd	+Vcc	Gnd	+Vcc
4	Gnd	+Vcc	+Vcc	Gnd

Tabla 4

7.5.1.3. Tipos de motores PaP según su construcción.

Desde el punto de vista de su construcción existen los siguientes tipos de motores paso a paso:

- De reluctancia variable (V.R.): Los motores de este tipo poseen un rotor de hierro dulce, que en condiciones de excitación del estator y bajo la acción de su campo magnético, ofrecen menor resistencia a ser atravesado por su flujo en la posición de equilibrio. El rotor gira para presentar la mínima reluctancia.

Su funcionamiento en condiciones de reposo (sin excitación) el rotor queda en libertad de girar y, por lo tanto, su posicionamiento de régimen de carga dependerá de su inercia y no será posible predecir el punto exacto de reposo, siendo esto muy poco conveniente.

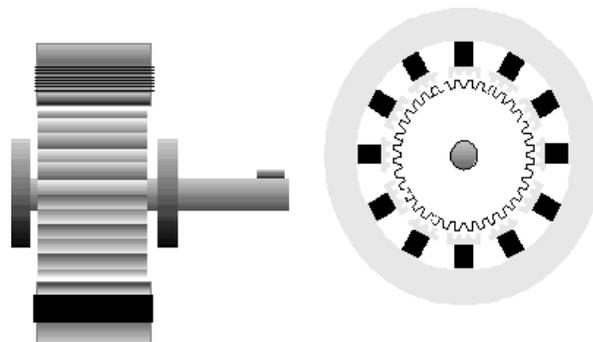


Figura: 14

Motor pap de reluctancia variable



- De magneto Permanente (PM): Está formado por un estator de forma cilíndrica, con un cierto número de bobinados alimentados en secuencia, que crean un campo magnético giratorio de manera discontinua. El rotor, concéntrico con el estator y situado sobre el eje, contiene un imán permanente magnetizado, que en cada instante tenderá a alinearse con el campo magnético creado. Su principal ventaja es que su posicionamiento no varía aun sin excitación y en régimen de carga debido a la atracción entre el rotor y los dientes del estator.

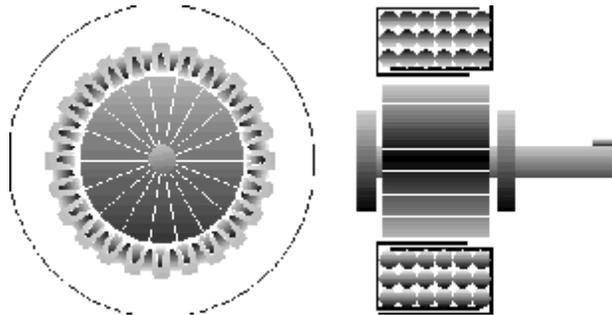


Figura: 15

Motor pap magneto permanente

- Híbridos: Son combinación de los dos tipos anteriores; el rotor suele estar constituido por anillos de acero dulce dentado de apilado simple, es decir, dos piezas de polos separados por un imán permanente, con los dientes opuestos desplazados una mitad de un salto de diente, (figura 16) para obtener una alta resolución de pasos. El estator es también dentado, en un número ligeramente distinto al del rotor, y dichos anillos están montados sobre un imán permanente dispuesto axialmente. El tipo Híbrido es probablemente el más usado de todos los motores por pasos. Poseen mejores características dinámicas, mejor rendimiento y son más silenciosos.

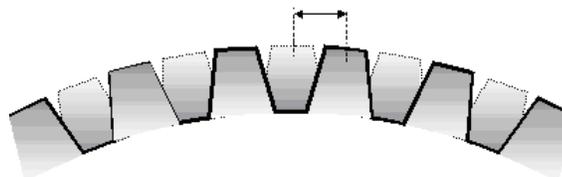


Figura: 16

Esquema de salto de diente

7.5.1.4. Motor seleccionado

Se ha seleccionado el motor SIZE 23 STEPPER 1200MNM6V de RS.

Éste, es un motor paso a paso híbrido tetrafásico que proporciona un par de trabajo y unas velocidades de paso mucho mayores que las que se obtienen con los tipos de imán permanente o de reluctancia variable, pero manteniendo al mismo tiempo una resolución muy alta debido al pequeño ángulo de paso.



Este motor produce pasos de salida discretos cuando se carga y acciona correctamente. El número de pasos y la velocidad de rotación vienen determinados respectivamente por el número de impulsos y la frecuencia de la señal de entrada.

Debido a que este elemento ha sido reutilizado del proyecto anterior, y que fue capaz de generar los pares necesarios para mover el anterior embolo, suponemos su buen funcionamiento.



Figura 17
Motor pap híbrido empleado.

Las características técnicas del motor paso a paso son:

Tensión nominal [V]	Corriente nominal [I]	Resistencia [Ω]	Inductancia [mH]	Par de detención [mN m]	Par de mantenimiento [mN m]	Precisión del ángulo de paso [%]	Ángulo de paso [$^\circ$]
6	1,8	3,5	7,3	77,6	1200	5	1,8

Tabla 5



7.5.2. Detectores de fin de carrera (Sensores)

Para mejorar el rendimiento de la bomba vamos a utilizar unos sensores, que nos indicaran el fin de carrera del émbolo, es decir, que detectaran la aproximación y llegada del émbolo al fin de carrera, emitiendo una señal que entrara en el ordenador. Esto nos permitirá realizar el cambio de sentido del émbolo, a través del cambio de sentido de giro del motor, y del cambio de aperturas de las válvulas de forma sincronizada y optima, debido a que el ordenador controla todos estos elementos.

Para la elección del sensor hemos tenido en cuenta la norma DIN EN 60529 (código IP) que es utilizada para la clasificación de receptáculos, cubiertas o componentes, respecto al acceso a partes peligrosas, ingreso de cuerpos sólidos extraños, protección ante el agua y otras características particulares de la cubierta.

El código IP se forma por las letras “IP” y dos números independientes uno del otro, de acuerdo al siguiente criterio:

- El primer número o “primera cifra característica” indica la protección de las personas respecto al acceso a partes peligrosas, limitando la penetración del cuerpo humano u objetos, así como la protección del contenido ante objetos sólidos extraños.

Su graduación va del 0 al 6, donde a mayor valor, más pequeño es el objeto que la cubierta deja pasar.

1ª Cifra	Descripción
0	No protegida
1	Protegida contra cuerpos sólidos de más de 50 mm
2	Protegida contra cuerpos sólidos de más de 12 mm
3	Protegida contra cuerpos sólidos de más de 2,5 mm
4	Protegida contra cuerpos sólidos de más de 1 mm
5	Protegida contra la penetración de polvo
6	Totalmente estanco al polvo

Tabla 6

- El segundo número o “segunda cifra característica” indica la protección del equipo en el interior de la cubierta contra la penetración del agua.

Su graduación es del 0 al 8, donde a mayor valor más agua intentando penetrar y en mayores direcciones.



2ª Cifra	Descripción
0	No protegida
1	Protegida contra la caída vertical de gotas de agua
2	Protegida contra la caída de gotas de agua con una inclinación máxima de 15°
3	Protegida contra la lluvia fina (pulverizada)
4	Protegida contra las proyecciones de agua
5	Protegida contra los chorros de agua
6	Protegida contra fuertes chorros de agua o contra la mar gruesa
7	Protegida contra los efectos de la inmersión
8	Protegida contra la inmersión prolongada (el fabricante especifica condiciones)

Tabla 7

Por lo tanto si nuestro sensor tiene que ser del tipo IP68 y el seleccionado es XS612B1PAL2, que es uno de los elementos reutilizados en el diseño anterior.

El funcionamiento del dispositivo consiste en dar una señal de salida sin contacto mecánico directo, la detección se funda en el fenómeno de la inducción electromagnética. El módulo de detección cumple tres funciones: producir el campo magnético alterno de excitación, detectar la energía degradada en la placa, que son las piezas de acero inoxidable que hay en el émbolo, accionar el módulo de conmutación. Al acercarse la placa varía la reluctancia magnética del conjunto, hasta que llega un momento en que la oscilación desaparece, detectándose la placa.



8. Estanqueidad

Una de las partes más críticas de este proyecto es la estanqueidad, esta es necesaria para un buen funcionamiento de la bomba, para lograrlo hemos tenido que hacer una selección entre las distintas opciones existentes en el mercado, las tres más viables son el sellado mediante una junta tórica, mediante una junta hidráulica y mediante retén, que pasaremos a describir a continuación.

8.1. Junta hidráulica

La junta hidráulica es un elemento mecánico utilizado en sistemas que utilizan líquidos. Permite la transmisión en forma homogénea de la fuerza de avance de un pistón a un fluido.

Debido a las diferentes solicitudes y exigencias generadas por múltiples casos de aplicación, se han desarrollado diferentes versiones de juntas de hidráulicas. Estas se pueden clasificar según la figura 1.

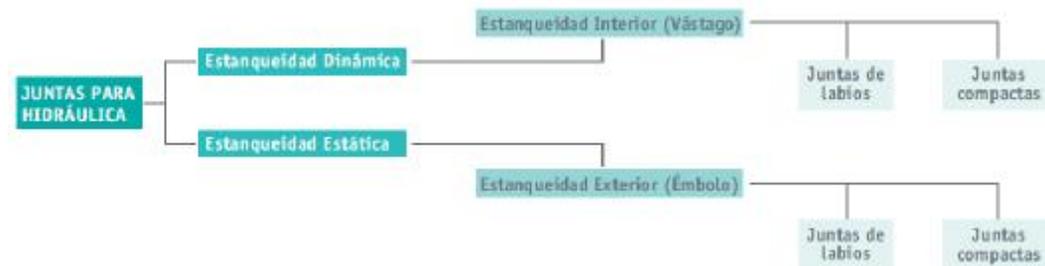


Figura 1
Clasificación de las juntas para hidráulicas

Hemos elegido la junta hidráulica SIMKO 300 por sus propiedades, ya que su funcionamiento es adecuado para émbolos de doble efecto y gracias a su buena estanqueidad estática y dinámica son perfectas para su uso, además de su buen funcionamiento a baja velocidad.

SIMKO 300

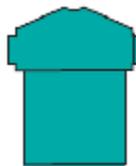


Figura 2
SIMKO 300

En las juntas hidráulicas existen dos partes diferenciadas la primera es la parte del anillo interior o anillo de deslizamiento, este es de un material duro, en este caso SIMRITAN (poliuretano), este soporta todas las tensiones ejercidas en la junta. La otra parte es el elemento de apriete de un material más blando caucho nitrílico (NBR) esta parte se encarga de que el elemento líquido que queremos sellar no pase llegando a soportar presiones de 40MPa.



Al final debido a la complejidad de montaje y la dificultad para obtener juntas tóricas de tamaño no estándar hemos optado por la utilización de las juntas tóricas.

8.2. Junta Tórica

Las juntas tóricas son aros de sección circular, utilizados para estanqueización de fluidos.



Figura 3
Tóricas

8.2.1. Funcionamiento

El efecto hermetizante de la junta tórica, se basa en la deformación axial o radial de su sección.



Figura 4
Esquema de hermetización descrito

Esta deformación se obtiene por un diseño adecuado del espacio de montaje. La fuerza de reacción así producida, proporciona la presión de apriete necesaria para la estanqueización. La presión de apriete queda adicionalmente intensificada por la presión del fluido que se trata de ser estanqueizado.

8.2.2. Respecto al diseño de la ranura.

Existen distintos tipos de cajeados trapecoidal, cuadrado, triangular, nosotros nos centraremos a en los cuadrados, debido a su simplicidad, fácil construcción y a que el resto de formas son utilizadas para casos especiales.

8.2.2.1. Diseño de la ranura

La ranura del alojamiento debe ser preferentemente rectangular. Por razones de construcción los flancos de la ranura pueden estar inclinados hasta un máximo de 5°.



La superficie interior del alojamiento debe ser siempre mayor que la superficie transversal de la junta tórica. Con ello se consigue que la presión del fluido incida sobre una zona relativamente grande de la superficie de la junta tórica, así como que exista suficiente espacio en el alojamiento por si eventualmente se presenta un aumento de volumen de la junta tórica debido a un ataque químico.

En las dimensiones para el diseño de los espacios de montaje de las juntas tóricas, se han tenido en cuenta ambos factores.



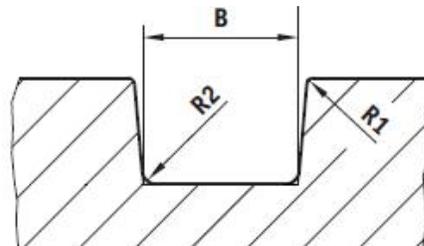
Figura 5

Muestra de el montaje correcto del alojamiento.

8.2.2.2. Chaflanes

Las aristas del cajeado serán achaflanadas según la norma, para evitar que corte la tórica cuando está sometido a esfuerzos cortantes, debido a que puede haber un pinzamiento entre la pared y la pieza.

B	R1	R2
< 3	0,1	0,25
≥3	0,2	0,5



Dimensiones en mm.

8.2.2.3. Retén

Los retenes se aplican para la estanqueidad de ejes en rotación, especialmente en la industria de fabricación de maquinaria, componentes y automóviles debido a su seguridad, larga duración montaje sencillo y bajo rozamiento.

Los medios a estanqueizar pueden ser viscosos, líquidos o gaseosos, aunque lo más usual es que se trate de aceites y grasas lubricantes.

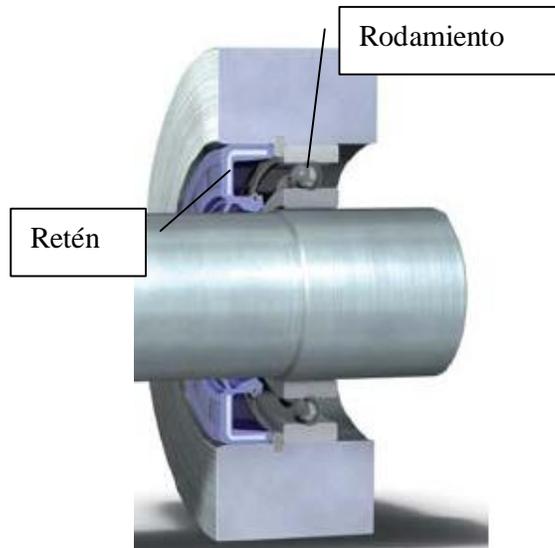


Figura 6

En la imagen se muestra como la junta tórica protege el rodamiento.

8.2.3. Zonas estancas

Existen tres zonas de la bomba que necesitamos estanqueizar con juntas tóricas para que no existan fugas en la bomba:

- Zona del pistón: esta zona ha sido sellada mediante una junta tórica, debido a que es la parte encargada de mover el fluido y generar el caudal es importante que el fluido no pase de una cámara a otra en grandes cantidades, pero tampoco puede ser demasiado estanco para que pueda haber movimiento, así pues hemos tenido que llegar a un acuerdo de estanqueidad-movilidad que nos permitiera un resultado óptimo.

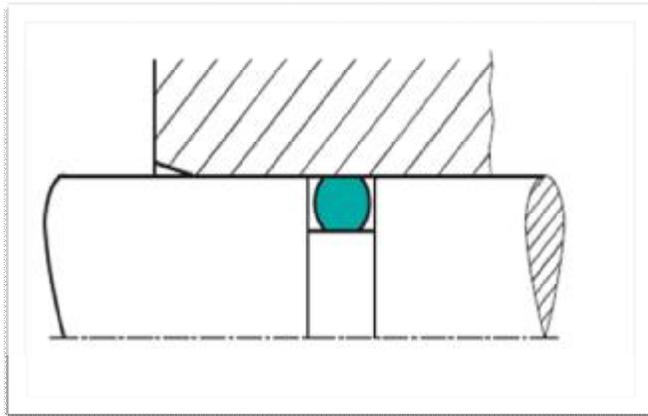


Figura 7

En las imágenes podemos ver a la izquierda el esquema del funcionamiento teórico y a la derecha la prueba de estanqueidad hecha en el laboratorio.



Dimensiones de la ranura para montaje flotante (movimiento axial sin deformación radial).

El montaje flotante resulta adecuado para la estanqueización de émbolos, no sufriendo deformación con esta aplicación la sección de la junta. Sus ventajas radican en un escaso rozamiento y un desgaste muy reducido.

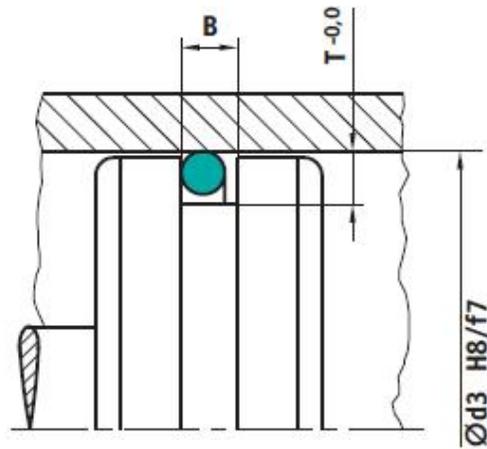
Al acumularse la presión, se escapa un poco el aire, hasta que la junta tórica acaba por cerrar la holgura entre los dos elementos en movimiento de la máquina.

Al determinar el tipo de junta tórica deberá tenerse en cuenta lo siguiente: el diámetro exterior de la junta tórica deberá ser de un 2 a un 5% mayor que el diámetro del cilindro d_3 . La junta tórica no deberá entrar en contacto con el fondo de la ranura.

Dimensiones de la ranura para el pistón:

d_2	T	B
3,53	4	$4,0 \pm 0,10$

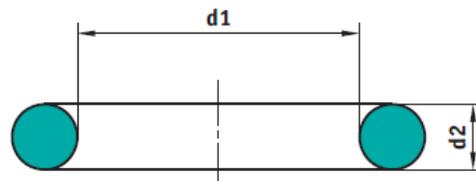
Dimensiones en mm.



En nuestro caso hemos escogido:

Material	d_1	d_2
FPM80	97	3,5

Dimensiones en mm.





- **Zona de sujeción con las tapas:** Esta zona es crítica debido a su situación y función, ya que además de estanqueizar la zona, la tórica se encargara en sujetar el cilindro de vidrio a la tapa.

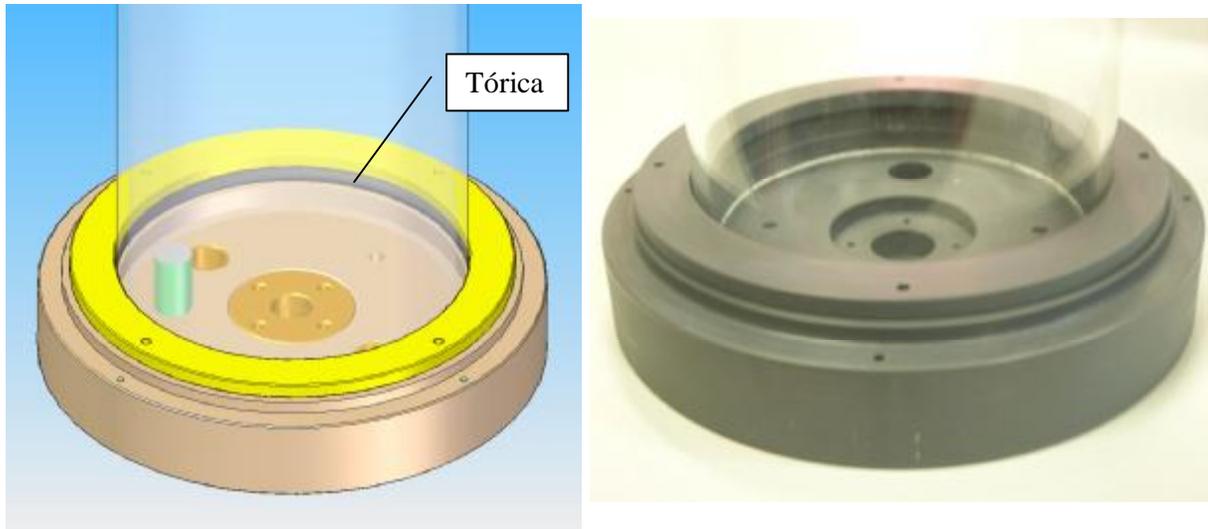


Figura 8

En la figura de la izquierda podemos ver el sistema de cierre, la tapa (de color cobrizo) y el anillo de la tórica (de color amarillo) se encargan de aplasta la tórica para que ejerza presión contra el vidrio y lo sujete. En la imagen derecha la tapa real.

Dimensiones de la ranura rectangular, para estanqueidad estática

En las aplicaciones de bridas y tapas, la sección de la junta tórica, queda deformada en sentido axial. Al determinar las dimensiones de la junta y el espacio de montaje, deberá tenerse en cuenta el sentido de la presión.

En caso de presión ejercida desde el exterior conviene que el diámetro interior de la junta sea igual o algo más reducido que el diámetro interior de la ranura.

Tratándose de una presión ejercida desde el interior, nuestro caso, es conveniente que el diámetro exterior de la junta sea igual o ligeramente mayor que el diámetro exterior de la ranura. Así se evita que, en el caso de producirse presión oscilante, el movimiento de la junta en la ranura del alojamiento produzca el desgaste de la misma.

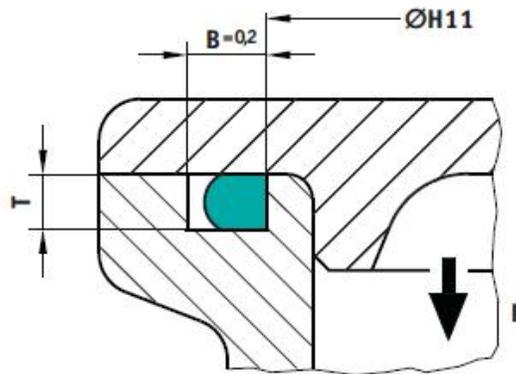
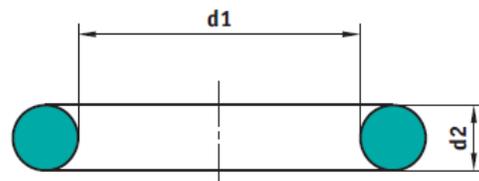


Figura 9

Sistema de montaje la ranura rectangular, para estanqueidad estática

En nuestro caso hemos escogido:

Material	d ₁	d ₂
NBR70	110,49	5,33



Dimensiones en mm.

- Zona de intersección entre las guías y la tapa: Debido al apriete existente entre la tapa y la guía podríamos considerar que esa zona es estanca, ya que no debería haber sobrepresiones que permitieran que el fluido escapara por esas pequeñas ranuras, aun así hemos confeccionado otro sistema de cierre por juntas tóricas situado en la zona exterior de la tapa en el que la tórica se sitúa en el cajeadado y es sellado por medio de una arandela (mirar figura 10).

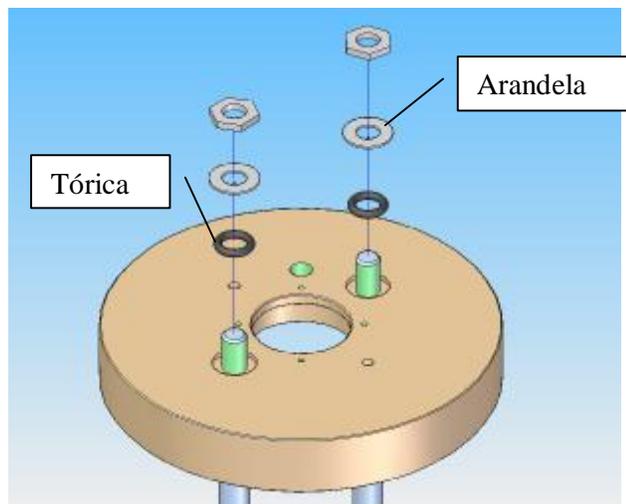


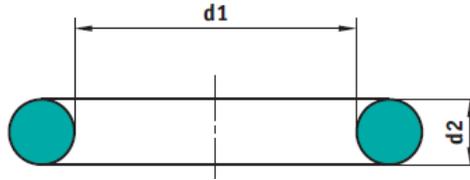
Figura 10

Imagen de explosionado del cierre



En nuestro caso hemos escogido:

Material	d ₁	d ₂
NBR70	10	3



Dimensiones en mm.

- Eje con la tapa: En este caso hemos tenido que hacer uso de un retén, ya que el eje se encuentra en rotación, y necesitamos estanqueizar de manera eficiente, para proteger el rodamiento. A esta zona se le añade la dificultad de haber reutilizado elementos del anterior proyecto con lo que hemos tenido que crear piezas para un sellado sin fugas, he aquí un esquema (Figura 11).

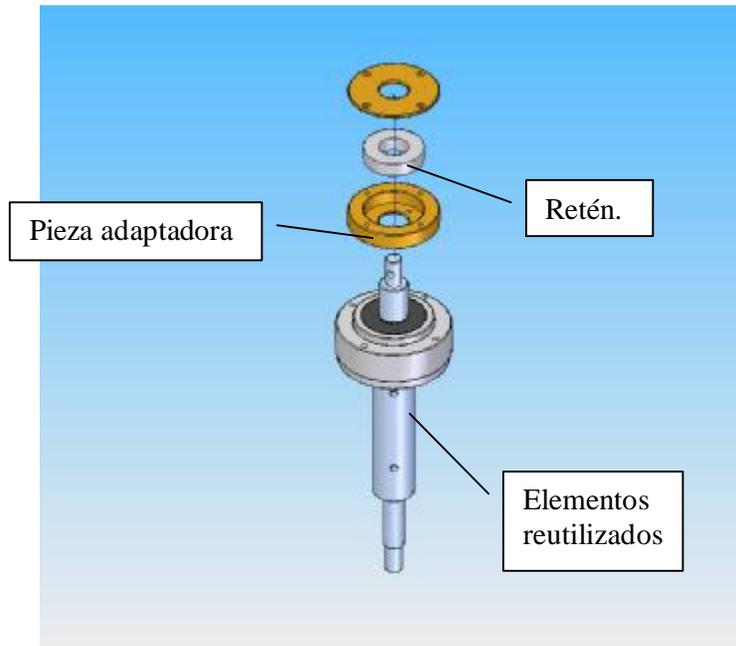


Figura 11

Podemos observar el explosionado del la zona del rodamiento.

El retén escogido es:

Retén radial SIMMERRING® con casco metálico (Acero no aleado DIN 1624) exterior recubierto de elastómero (72 NBR 902), labio de estanqueidad equipado con muelle de presión (Acero para muelles DIN 17223).

Funciona en aceites minerales, aceites sintéticos, grasas.



Temperatura de funcionamiento de -40°C . a $+100^{\circ}\text{C}$. (en cortos intervalos hasta $+120^{\circ}\text{C}$).

d	D	b	b1	Material
14	30	7	6,5	72 NBR 902

Velocidad periférica: Hasta 14 m/s.



Figura 12

$d = \varnothing$ eje, $D = \varnothing$ alojamiento, $b =$ anchura del alojamiento, $b1 =$ anchura del retén entre labios; todas las medidas están en milímetros.

Material utilizado en tóricas y retén.

NBR70 y NBR902

El NBR (Caucho acrilnitrilo butadieno) es un material de caucho de celdas mixtas de gran elasticidad a la presión y capacidad antagonista.

Este es utilizado en fábricas de alimentación, debido a su buena resistencia a los aceites y grasa minerales. Se emplea con fluidos hidráulicos y aire, su temperatura de trabajo ronda entre -35°C a $+100^{\circ}\text{C}$

Dureza del NBR

La dureza del NBR afecta a su aplicación y la presión que es capaz de soportar si:

Presión (bar)	Dureza del material
≤ 160	70 Shore A
>160	90 Shore A

Tabla 1



Fluorelastómero Viton

Es un material con gran resistencia química, por ello es utilizado casi todo tipo de recubrimientos, su principal aplicación es en:

- Tanques para almacenamiento de petróleo
- Tanques para almacenamiento de productos petroquímicos
- Tanques para almacenamiento recuperación de vapor
- Tuberías.
- Componentes del automóvil.
- Industrias de recubrimiento de suelos.
- Recubrimiento de cualquier tipo de pieza.

Resistencia a la tracción (Kg/cm ²)	Goma Pura	85
	Con Carga Negra	110-200
Límite de Dureza (Sh A)		50 a 90
Peso Específico (Material base)		1.8
Adhesión a Metales		Regular a Buena
Resistencia al Desgarramiento		Regular a Buena
Resistencia a la Abrasión		Buena
Deformación por compresión		Excelente
Resistencia Dieléctrica		Muy Buena
Permeabilidad a los Gases		Muy Baja
Resistencia a los disolventes	Hidrocarburos Alifáticos	Excelente
	Hidrocarburos Aromáticos	Excelente
Resistencia a:	Hinchamiento en Aceite Lubricante	Excelente
	Aceite y Gasolina	Excelente
	Aceites vegetales y animales	Excelente
	Oxidación	Prominente

Tabla 2
Comportamiento del Fluorelastómero Viton a distintos elementos y fuerzas.



9. Presupuesto:

Unidades	Descripción	Precio unitario (€)	Precio Total con IVA (€)
3	Barras rectificadas H7	62	215,76
1	Piezas en PVC de 180 ø x 150 mm	21	23,5
1	Piezas en PVC de 140 ø x 30 mm	14	15,75
1	Casquillos comerciales	15,75	15,75
2	Retén /BAU 14 x 30 x 7	9	20,55
4	Tórica/ OR 511.220	15	65,36
4	Tórica/ OR 401.000	1,5	27,92
2	Tórica/ OR VI 308.059	18,5	39,78
4	Cilindros huecos de borosilicato	60	255
2	Planchas de aluminio 180 x 180 x10	8,59	20,18
4	Planchas de aluminio 180 x 180 x20	17,18	84,72
1	Barra aluminio 24ø- 3,5m	16	17,45
1	Barra aluminio 190ø- 65mm	14	16,79
1	Latón 45ø x 29	18	23

841,51€

No ha habido costes de fabricación, gracias a que se han fabricado en la universidad. A todos estos costes habría que añadirle el del sistema eléctrico ya pagado en el proyecto anterior.

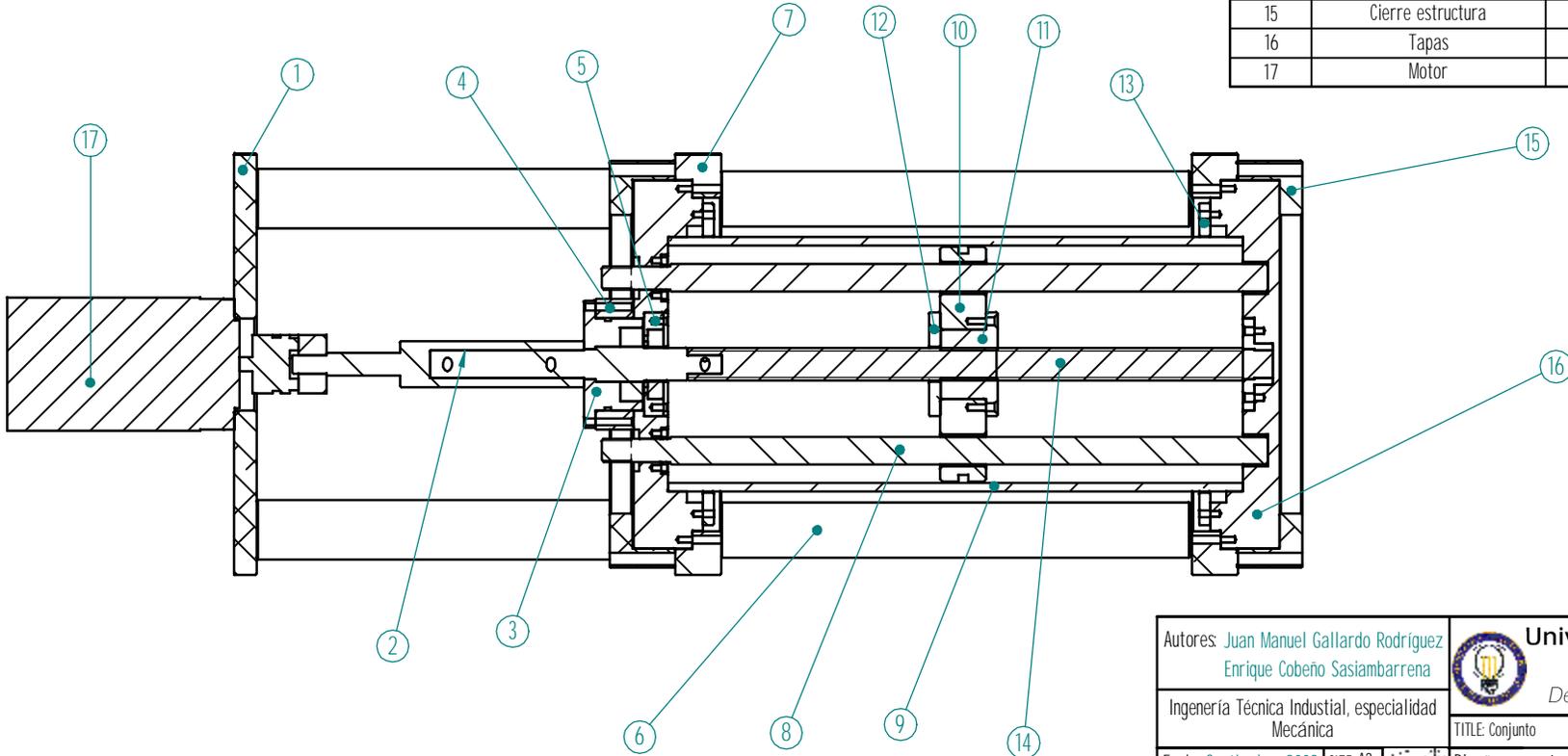
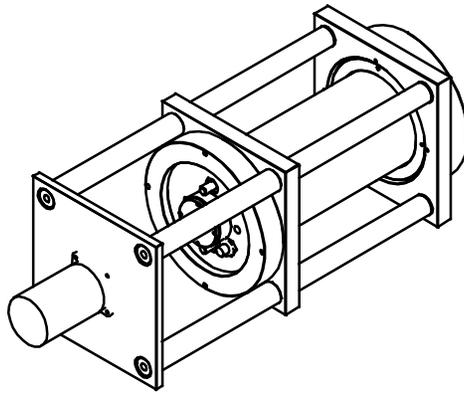
10. Conclusiones del proyecto

Como conclusiones de este proyecto podemos destacar, que hemos cumplido todos los objetivos marcados, como solucionar los problemas más graves del diseño anterior, además de aportarle al nuevo diseño las nuevas metas marcadas (mayor accesibilidad, montaje y desmontaje más sencillo y una reducción de volumen).

Esta bomba es susceptible a algunas ligeras modificaciones y complementos, como es el aporte de electroválvulas de tres vías a la entrada y la salida del flujo en la bomba, para regular el flujo pulsante, generado por tratarse de una bomba de pistón de doble efecto.



11. Planos



Historial de piezas

Referencia	Descripción	Cantidad	Material
1	Tapa motor	1	Aluminio
2	Transmisores	2	Acero inoxidable
3	Adaptador del rodamiento	1	Latón
4	Adaptador del eje	1	Delrin
5	Adaptador del retén	1	Latón
6	Tensores	4	Aluminio
7	Estructura interior	2	Aluminio
8	Guías	2	Acero inoxidable
9	Cilindro	1	Vidrio borosilicatado
10	Delrin	1	Delrin
11	Centro émbolo 1	1	Latón
12	Centro émbolo 2	1	Latón
13	Anillo tórica	2	PVC
14	Tornillo sinfin	1	Acero inoxidable
15	Cierre estructura	2	Aluminio
16	Tapas	2	PVC
17	Motor	1	

Autores: Juan Manuel Gallardo Rodríguez
 Enrique Cobeno Sasiambarrena
 Ingeniería Técnica Industrial, especialidad
 Mecánica

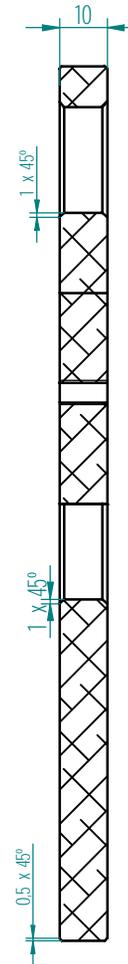
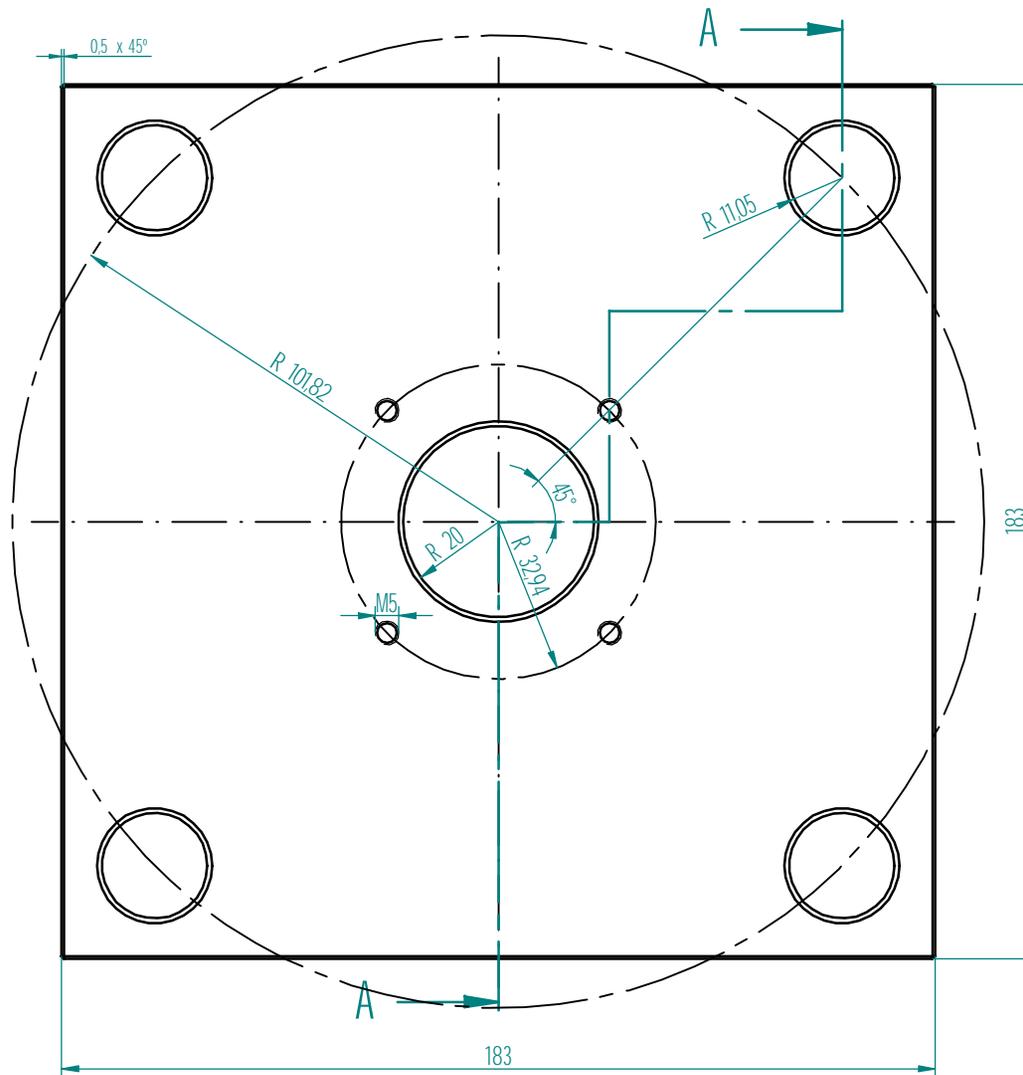


Universidad Carlos III de Madrid
 Departamento de Fluidos

TITLE: Conjunto

Fecha: Septiembre 2009 SIZE: A3
 Escala: 1:2 Plano nº: 0 Unidades en mm

Diseño y construcción de una bomba de simulación de flujo cardíaco.



SECTION A-A

Autores: CORAZON Gallardo Rodriguez
Enrique Coboño Sasiambarrena

Ingeniería Técnica Industrial, especialidad
Mecánica

Fecha: Septiembre 2009 SIZE: A3

Escala: 1:1 Plano nº: 1 Unidades en mm

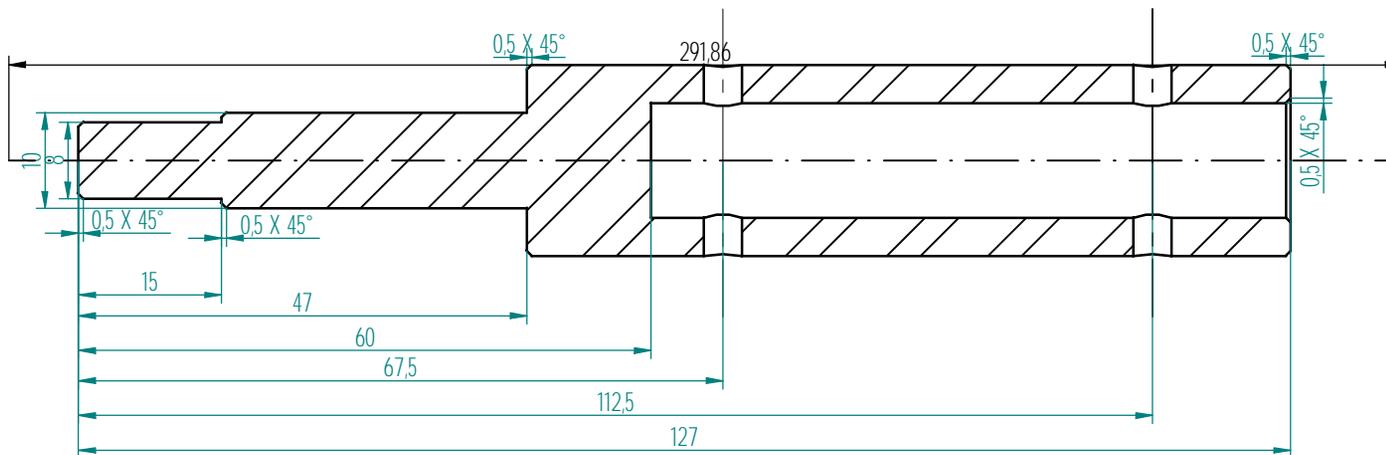
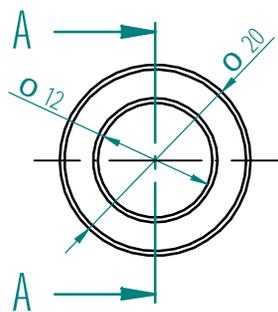


Universidad Carlos III de
Madrid

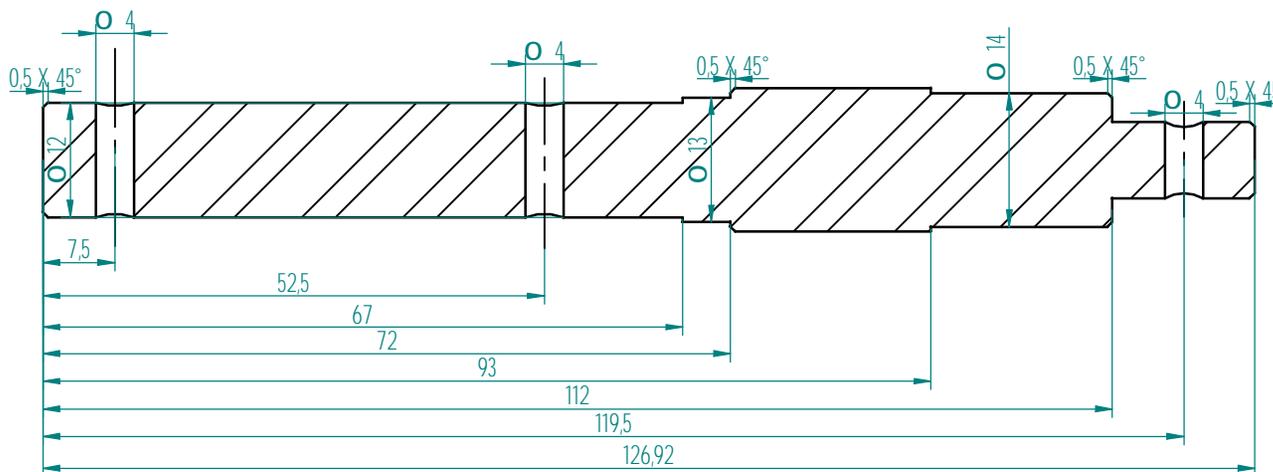
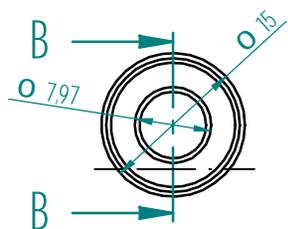
Departamento de Fluidos

Plano: Tapa de motor

Diseño y construcción de una bomba de simulación
de flujo cardíaco.

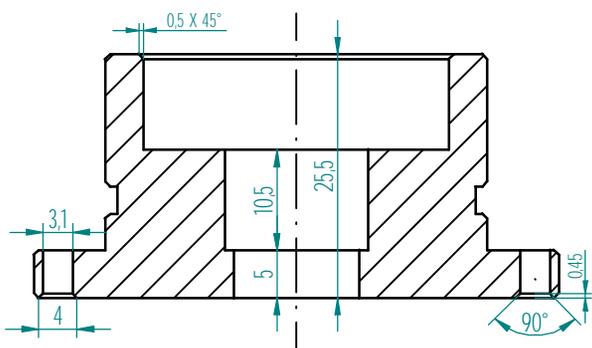
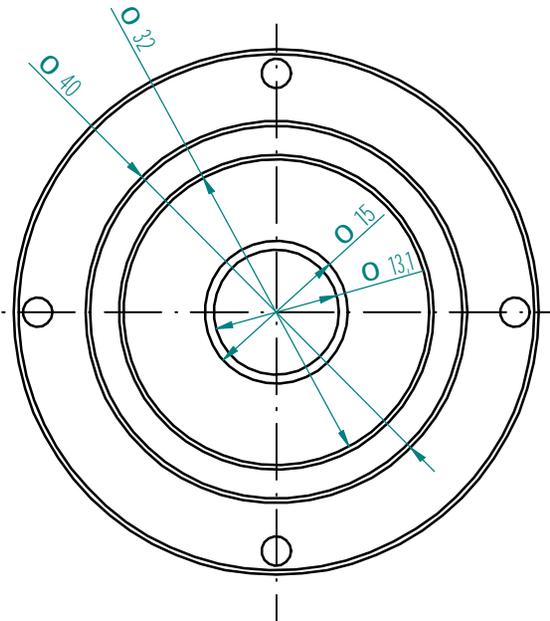
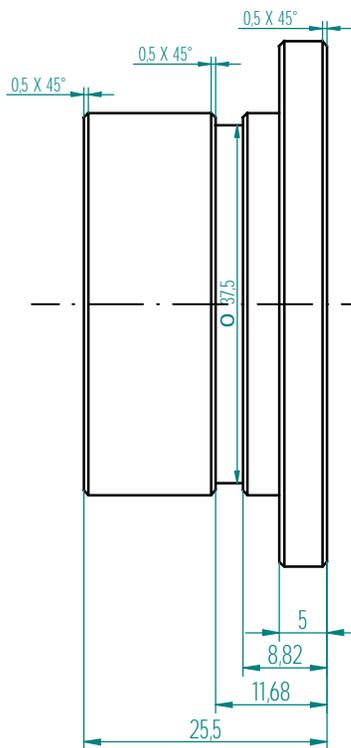
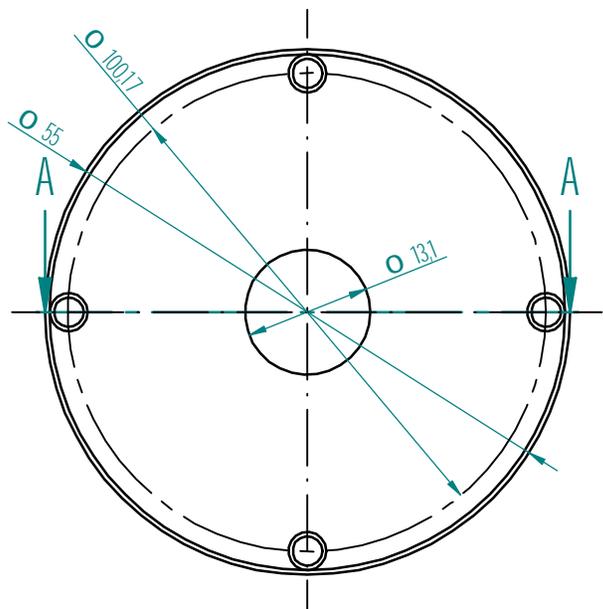


SECTION A-A



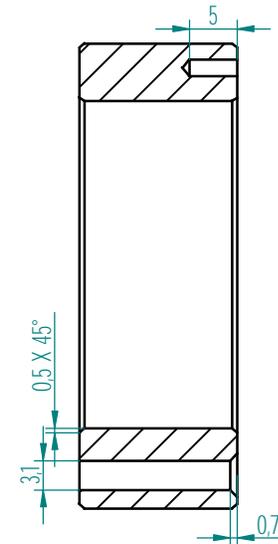
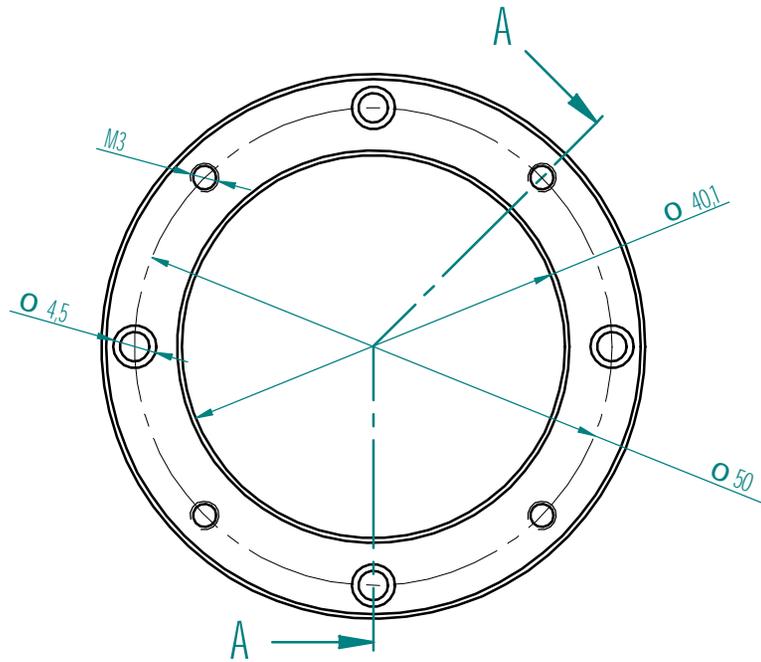
SECTION B-B

Autores: Juan Manuel Gallardo Rodríguez Enrique Cobeno Sasiambarrena		 Universidad Carlos III de Madrid Departamento de Fluidos
Ingeniería Técnica Industrial, especialidad Mecánica		
Fecha: Septiembre 2009		Plano: Transmisores
Escala: 2:1	Plano nº: 2	Diseño y construcción de una bomba de simulación de flujo cardíaco.

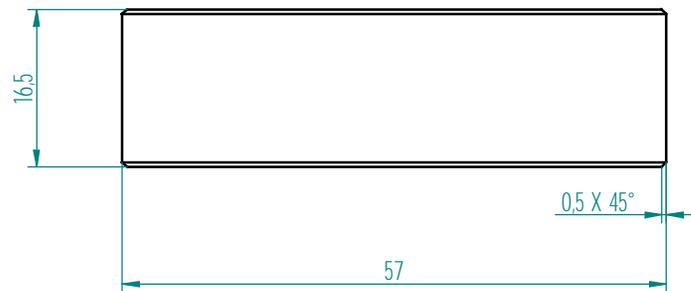


SECTION A-A

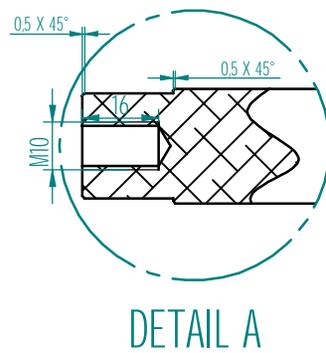
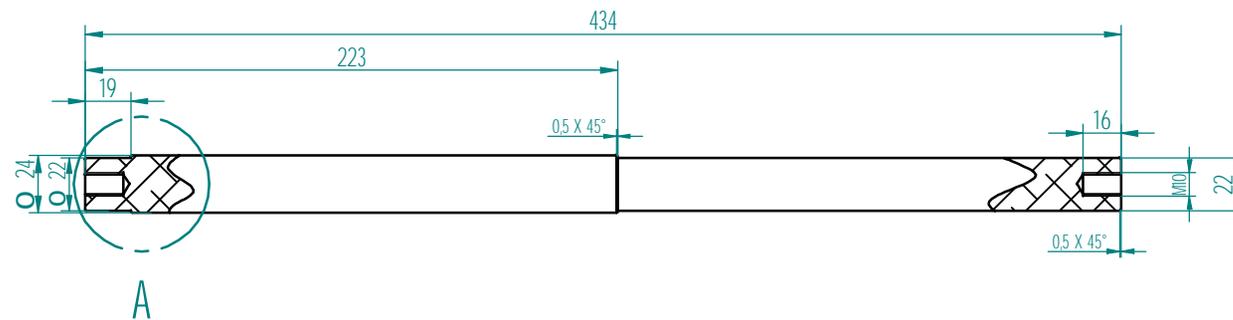
Autores: Juan Manuel Gallardo Rodríguez Enrique Cobeno Sasiambarrena		 Universidad Carlos III de Madrid Departamento de Fluidos
Ingeniería Técnica Industrial, especialidad Mecánica		
Fecha: Septiembre 2009	SIZE: A3	Plano: Adaptador de rodamiento
Escala: 2:1	Plano nº: 3	Unidades en mm
Diseño y construcción de una bomba de simulación de flujo cardíaco.		



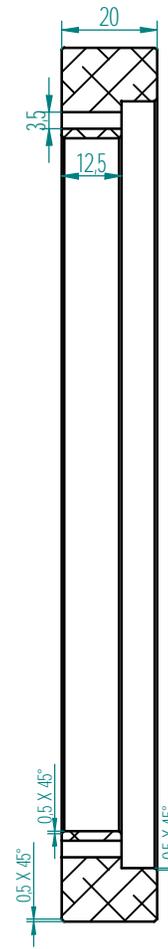
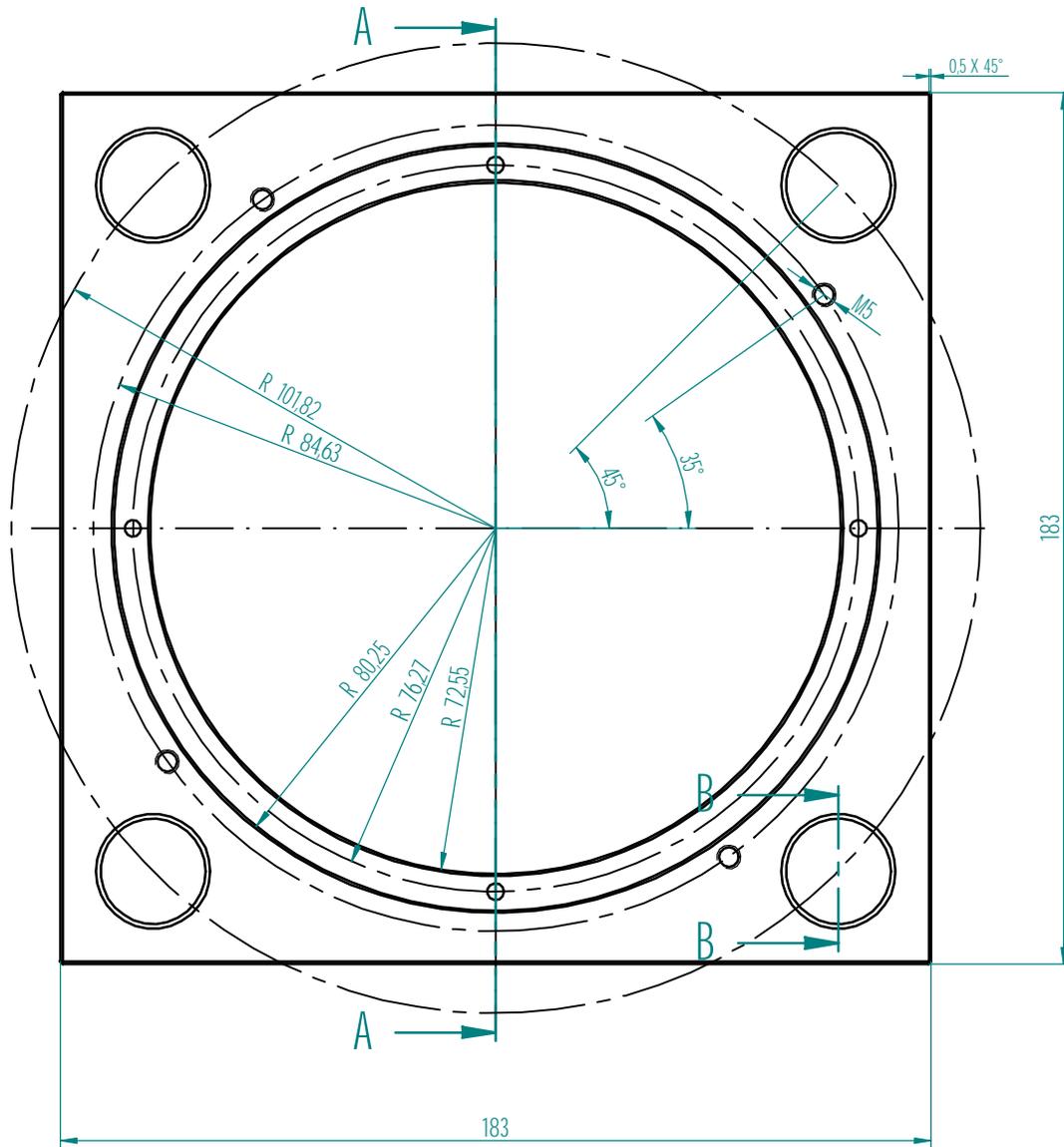
SECTION A-A



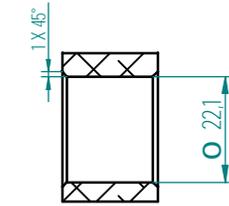
Autores: Juan Manuel Gallardo Rodríguez Enrique Coboño Sasiambarrena		 Universidad Carlos III de Madrid Departamento de Fluidos
Ingeniería Técnica Industrial, especialidad Mecánica		
Fecha: Septiembre 2009		TÍTULO: Adaptador del eje
Escala: 2:1	Plano nº: 4	SIZE: A3 Unidades en mm Diseño y construcción de una bomba de simulación de flujo cardíaco.



Autores: Juan Manuel Gallardo Rodríguez Enrique Coboño Sasiambarrena			 Universidad Carlos III de Madrid Departamento de Fluidos
Ingeniería Técnica Industrial, especialidad Mecánica			
Plano: Tensor			Diseño y construcción de una bomba de simulación de flujo cardíaco.
Fecha: Septiembre 2009	SIZE: A3		
Escala: 2:1	Plano nº: 6	Unidades en mm	

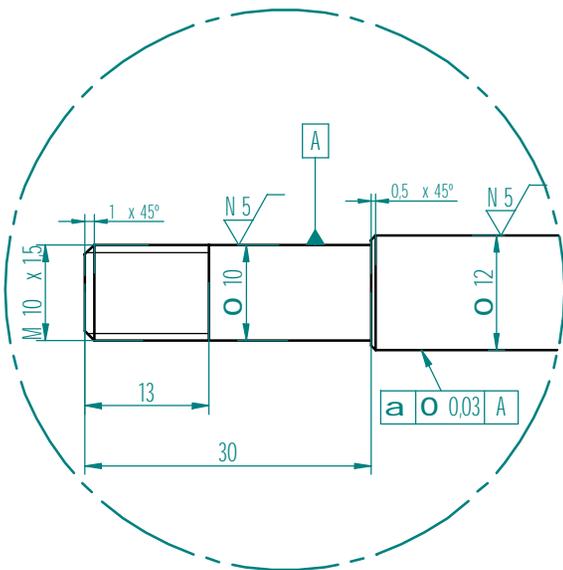
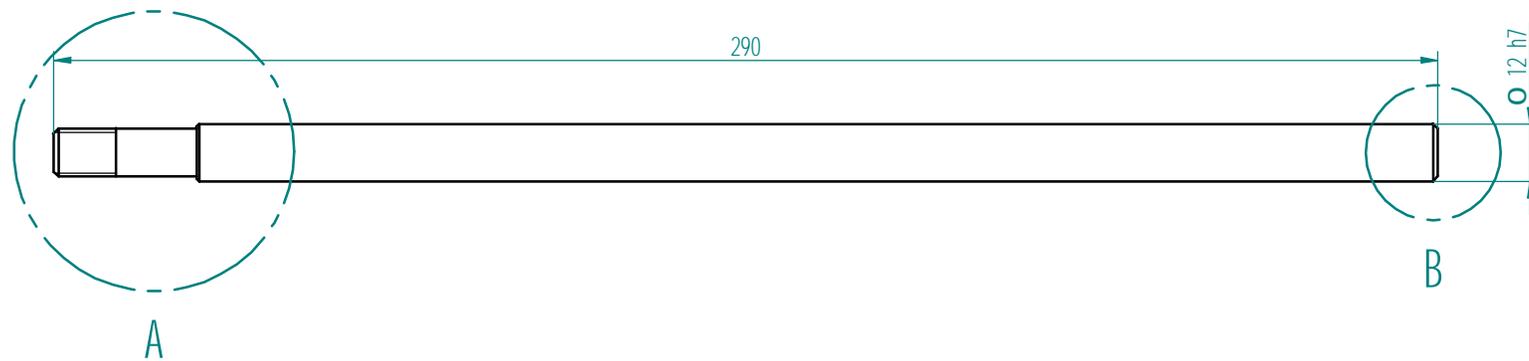


SECTION A-A

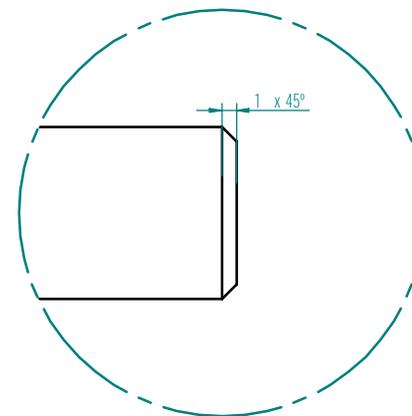


SECTION B-B

Autores: Juan Manuel Gallardo Rodríguez Enrique Cobeno Sasiambarrena		 Universidad Carlos III de Madrid Departamento de Fluidos
Ingeniería Técnica Industrial, especialidad Mecánica		
Fecha: Septiembre 2009		Plano: Estructura interior
Escala: 1:1	Plano nº: 7	Diseño y construcción de una bomba de simulación de flujo cardíaco.
SIZE: A3	Unidades en mm	

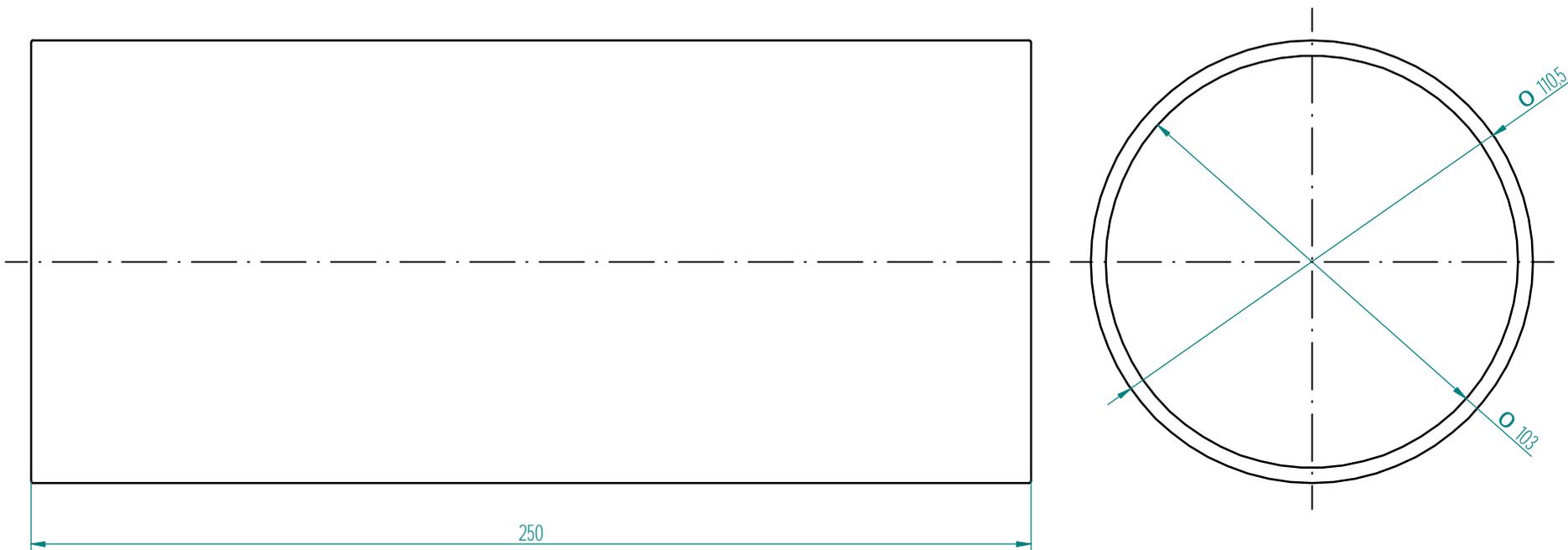


DETAIL A

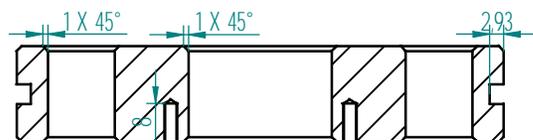
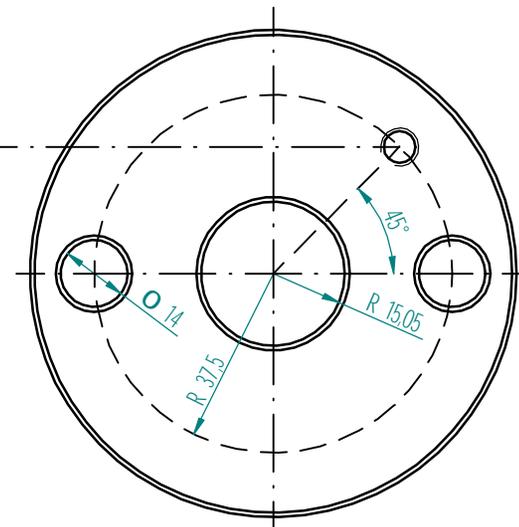
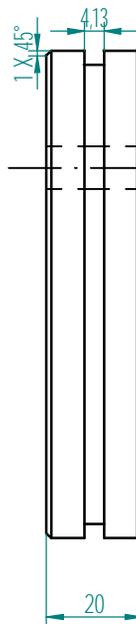
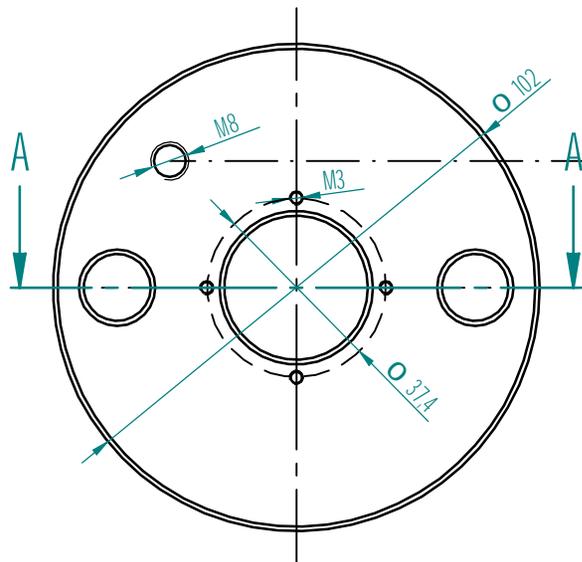


DETAIL B

Autores: Juan Manuel Gallardo Rodríguez Enrique Coboño Sasiambarrena		 Universidad Carlos III de Madrid Departamento de Fluidos
Ingeniería Técnica Industrial, especialidad Mecánica		
Fecha: Septiembre 2009		Plano: Guía
Escala: 1:1	Plano nº: 8	Diseño y construcción de una bomba de simulación de flujo cardíaco.



Autores: Juan Manuel Gallardo Rodríguez Enrique Coboño Sasiambarrena		 Universidad Carlos III de Madrid <i>Departamento de Fluidos</i>
Ingeniería Técnica Industrial, especialidad Mecánica		
Fecha: Septiembre 2009		Plano: Cilindro
Escala: 1:1	Plano nº: 9	SIZE: A3 Unidades en mm Diseño y construcción de una bomba de simulación de flujo cardíaco.



SECTION A-A

Autores: Juan Manuel Gallardo Rodríguez
Enrique Coboño Sasiambarrena

Ingeniería Técnica Industrial, especialidad
Mecánica

Fecha: Septiembre 2009 SIZE: A3

Escala: 1:1 Plano nº: 10 Unidades en mm

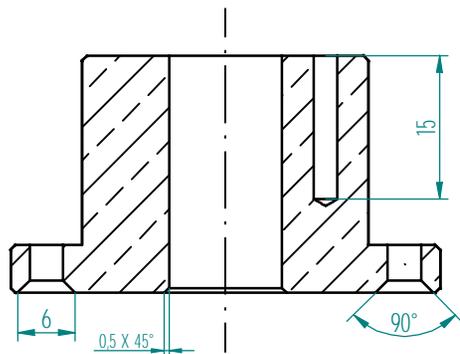
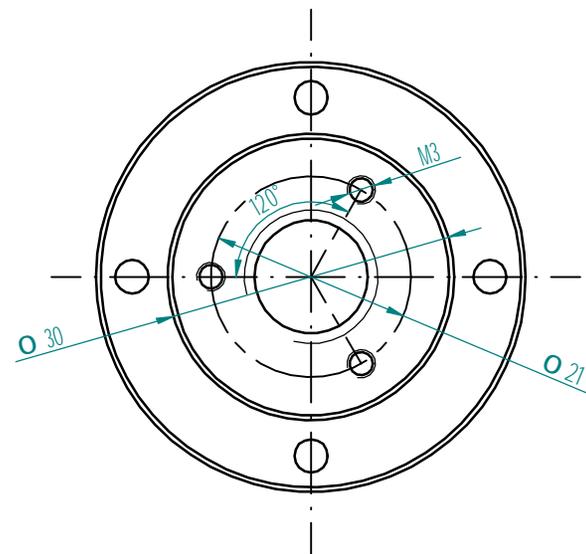
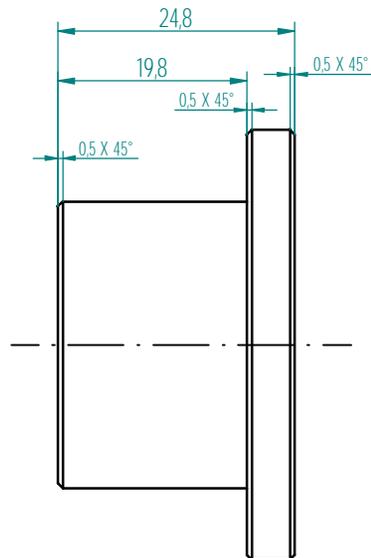
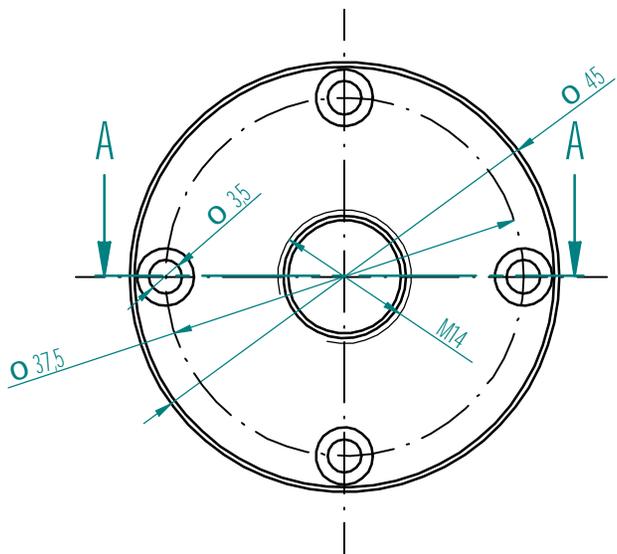


Universidad Carlos III de
Madrid

Departamento de Fluidos

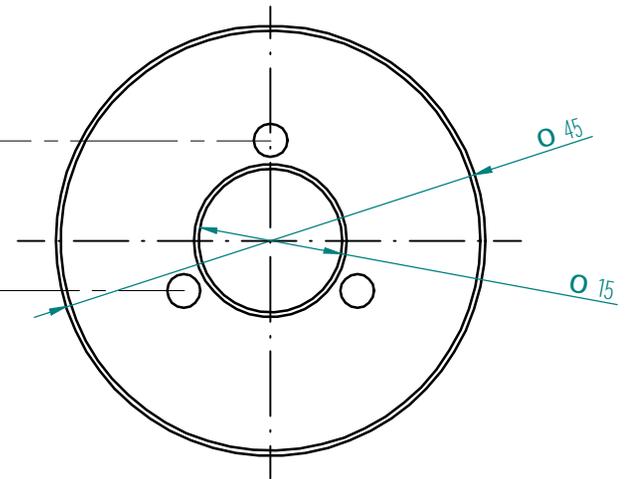
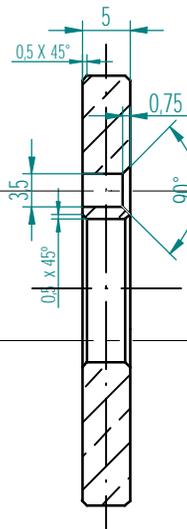
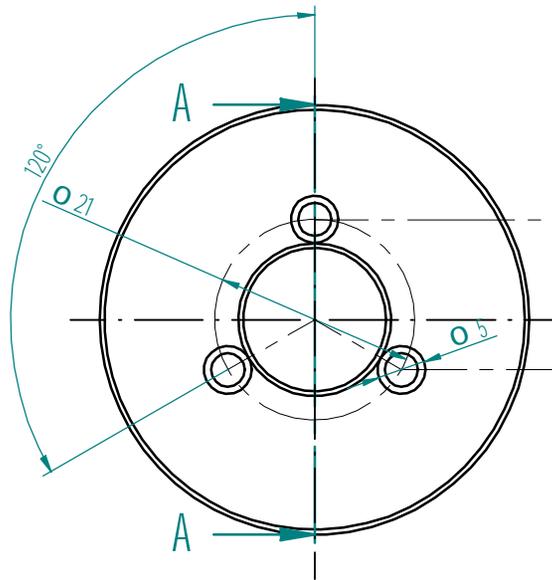
TITLE: Delrin

Diseño y construcción de una bomba de simulación
de flujo cardíaco.



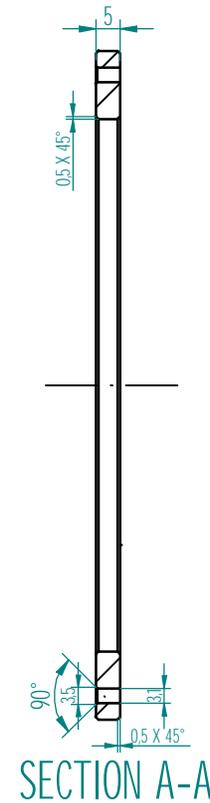
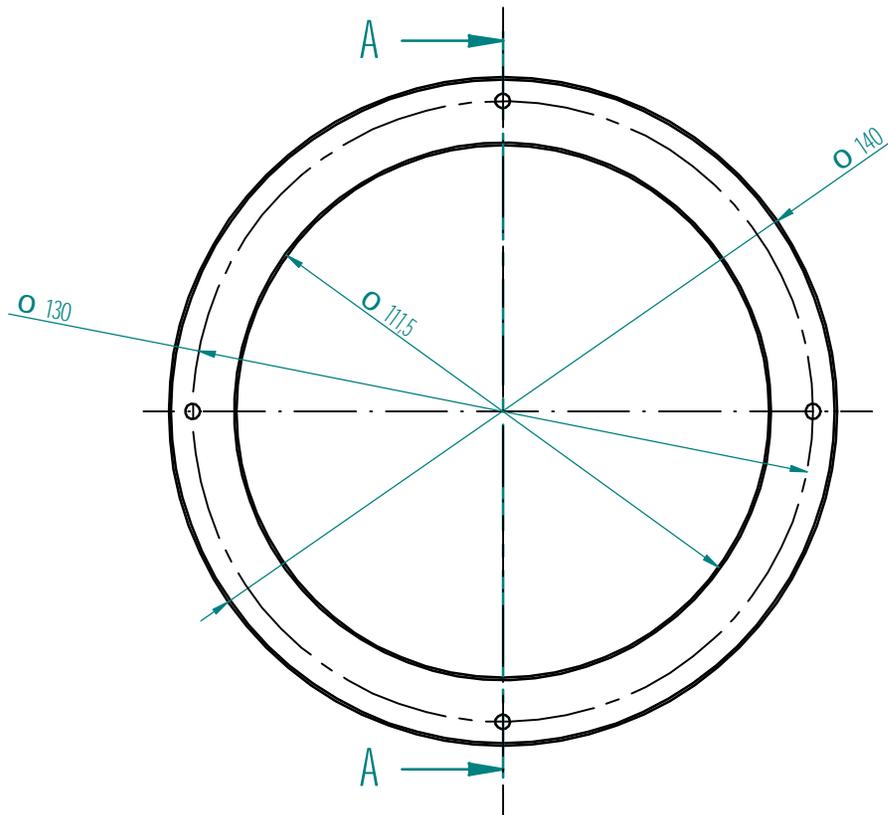
SECTION A-A

Autores: Juan Manuel Gallardo Rodríguez Enrique Cobeno Sasiambarrena		 Universidad Carlos III de Madrid Departamento de Fluidos
Ingeniería Técnica Industrial, especialidad Mecánica		
Fecha: Septiembre 2009		Plano: Centro del embolo parte 1
Escala: 2:1	Plano nº: 11	SIZE: A3 Unidades en mm Diseño y construcción de una bomba de simulación de flujo cardíaco.

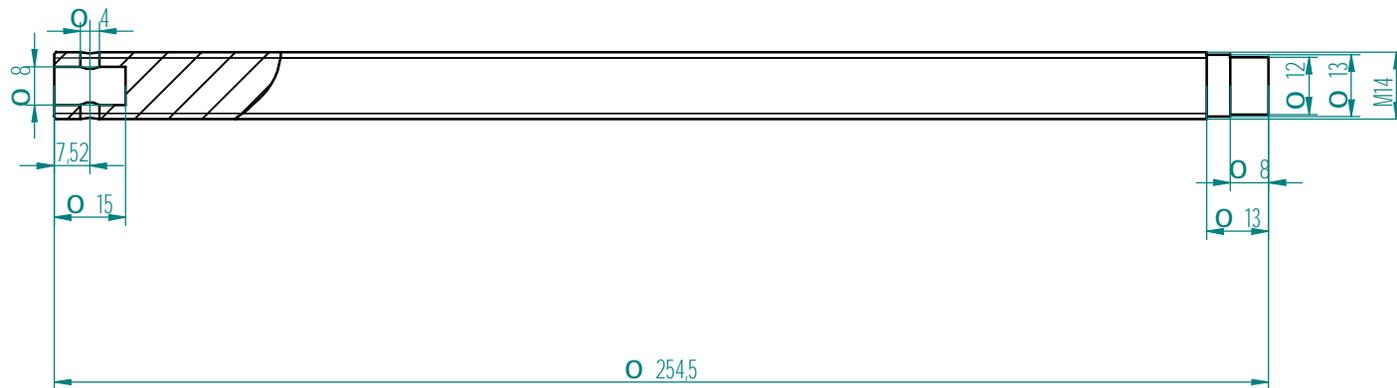


SECTION A-A

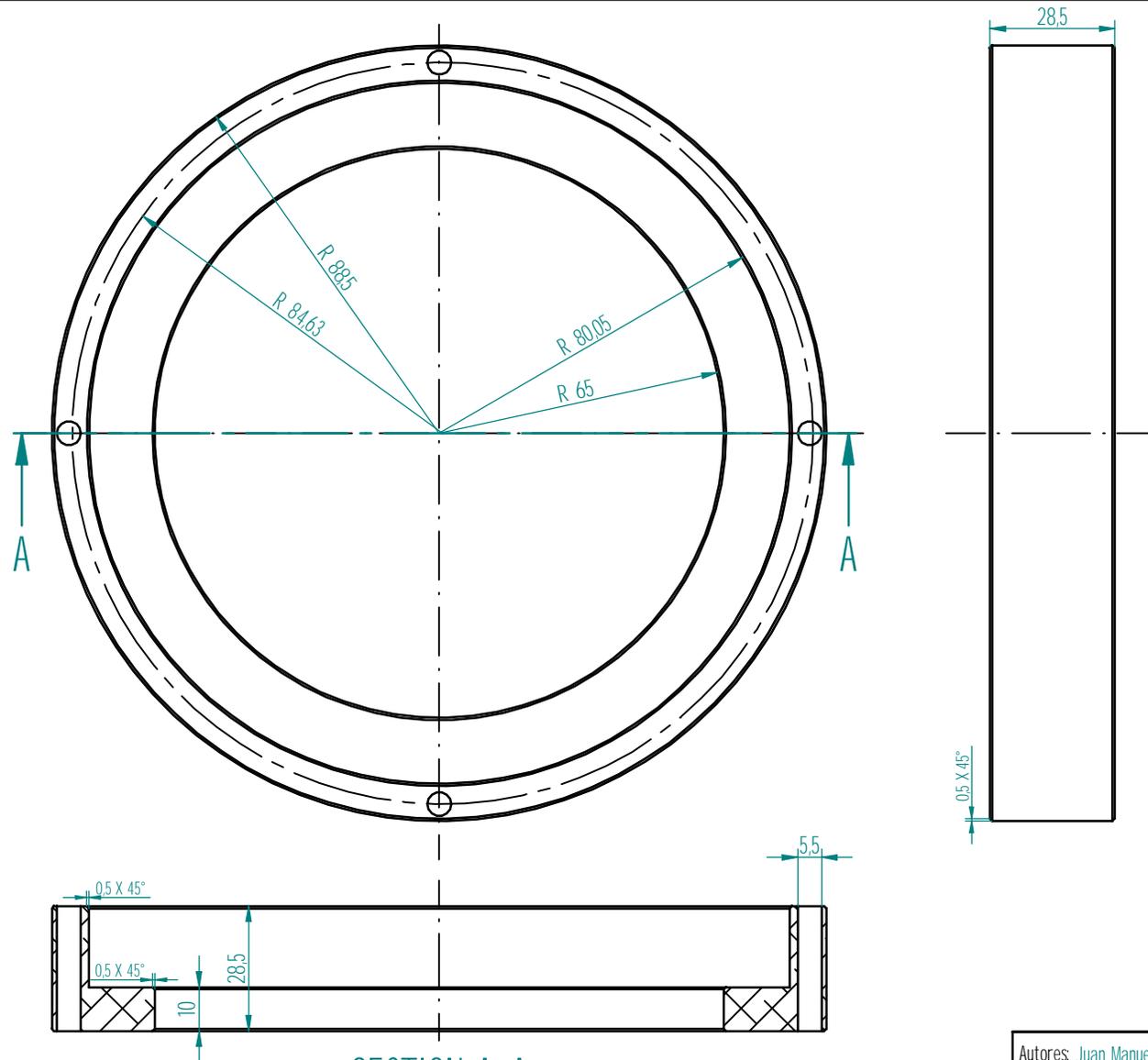
Autores: Juan Manuel Gallardo Rodríguez Enrique Coboño Sasiambarrena		 Universidad Carlos III de Madrid Departamento de Fluidos
Ingeniería Técnica Industrial, especialidad Mecánica		
Fecha: Septiembre 2009		Plano: Centro del embolo parte 2
Escala: 2:1	Plano nº: 12	SIZE: A3 Unidades en mm Diseño y construcción de una bomba de simulación de flujo cardíaco.



Autores: Juan Manuel Gallardo Rodríguez Enrique Cobeno Sasiambarrena		 Universidad Carlos III de Madrid Departamento de Fluidos
Ingeniería Técnica Industrial, especialidad Mecánica		
Fecha: Septiembre 2009	SIZE: A3	Diseño y construcción de una bomba de simulación de flujo cardíaco.
Escala: 1:1	Plano nº: 13	
Unidades en mm		

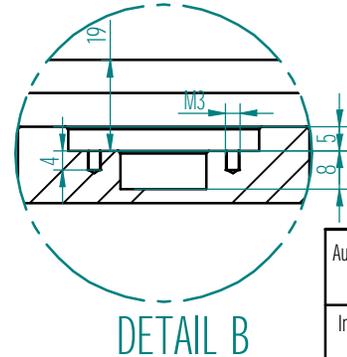
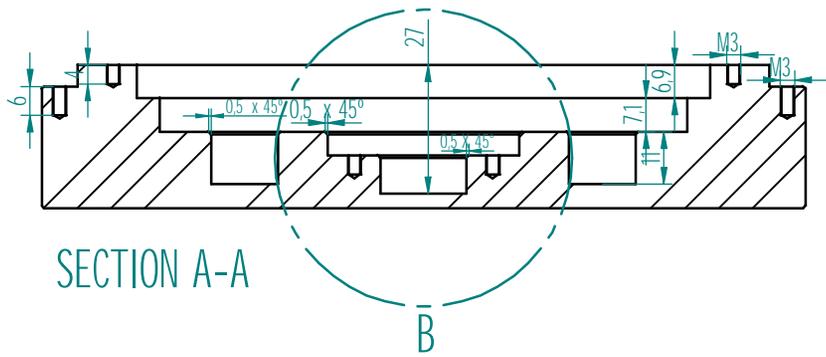
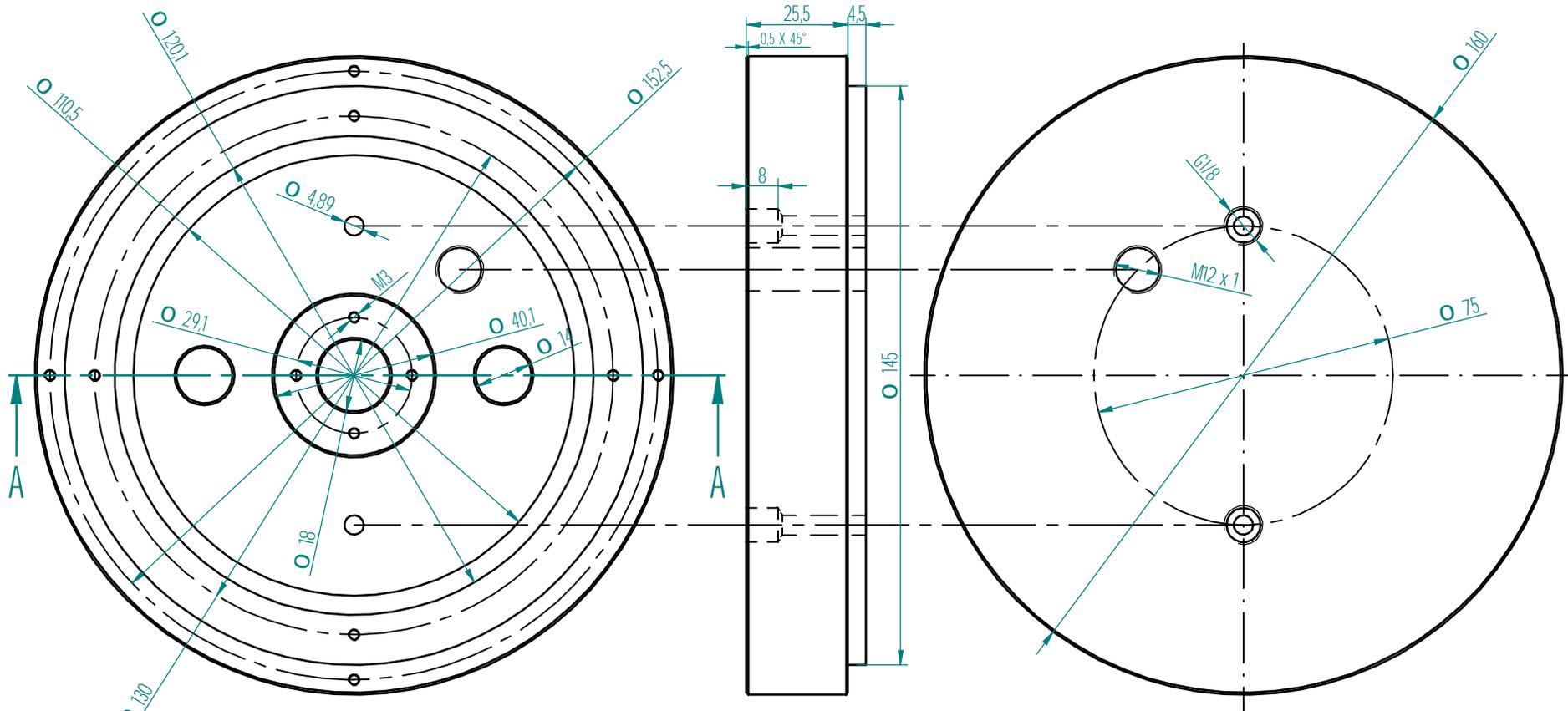


Autores: Juan Manuel Gallardo Rodríguez Enrique Coboño Sasiambarrena		 Universidad Carlos III de Madrid Departamento de Fluidos
Ingeniería Técnica Industrial, especialidad Mecánica		
Fecha: Septiembre 2009		TITLE: Tornillo sin fin
Escala: 1:1	Plano nº: 14	SIZE: A3 Unidades en mm Diseño y construcción de una bomba de simulación de flujo cardíaco.



SECTION A-A

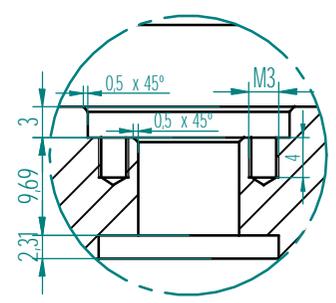
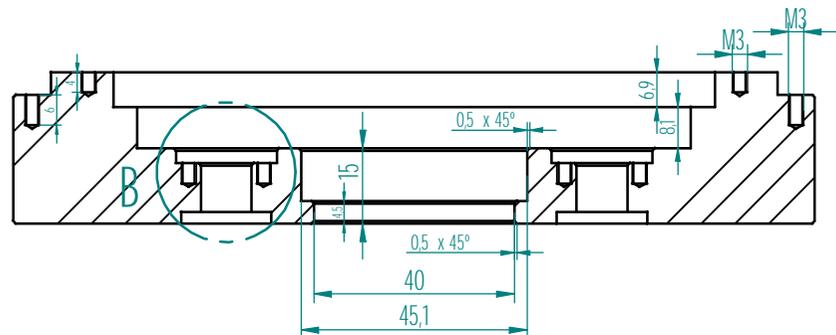
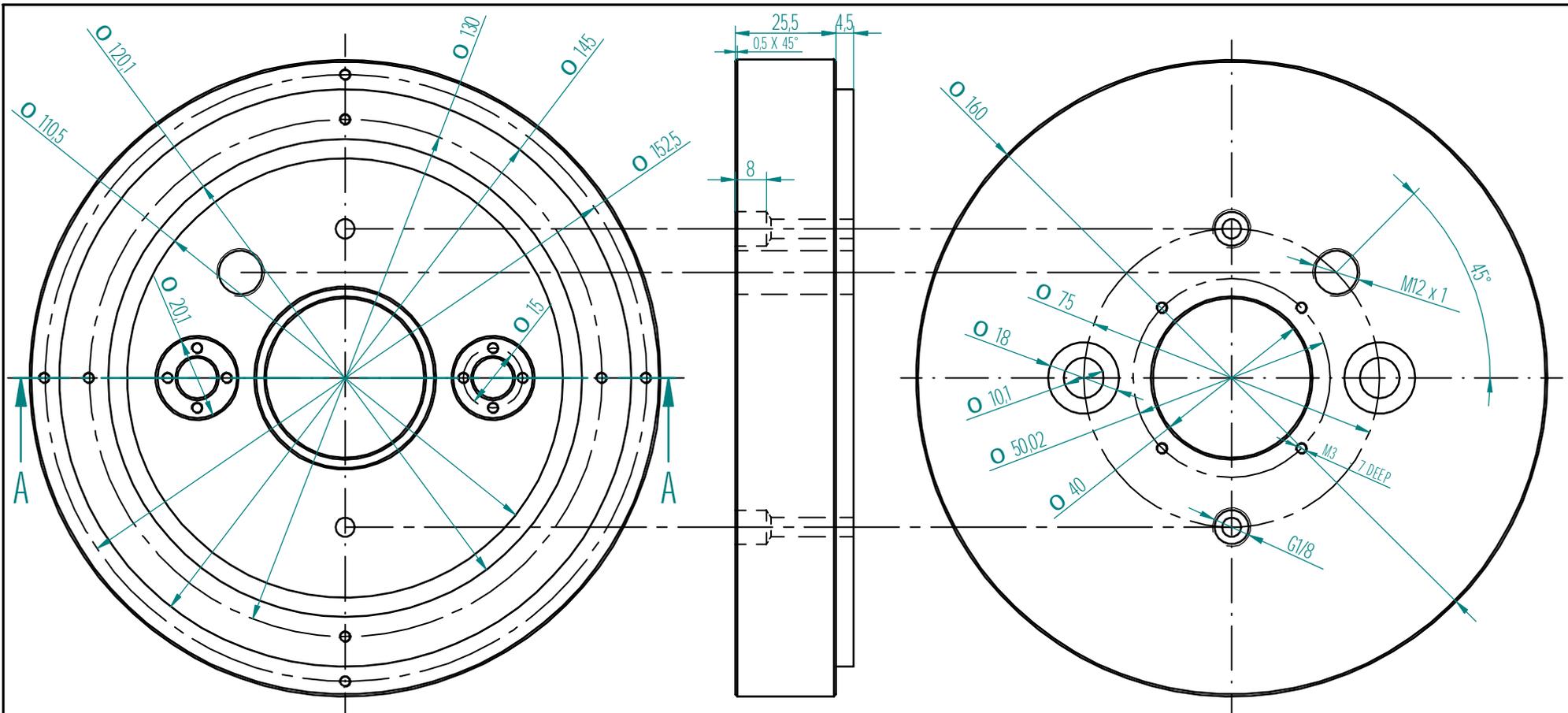
Autores: Juan Manuel Gallardo Rodríguez Enrique Coboño Sasiambarrena		 Universidad Carlos III de Madrid Departamento de Fluidos
Ingeniería Técnica Industrial, especialidad Mecánica		
Fecha: Septiembre 2009		Diseño y construcción de una bomba de simulación de flujo cardíaco.
Escala: 2:1 Plano nº: 15 Unidades en mm	SIZE: A3	



SECTION A-A

DETAIL B

Autores: Juan Manuel Gallardo Rodríguez Enrique Coboño Sasiambarrena		 Universidad Carlos III de Madrid Departamento de Fluidos
Ingeniería Técnica Industrial, especialidad Mecánica		
Fecha: Septiembre 2009	SIZE: A3	Plano: Tapa exterior
Escala: 1:1	Plano nº: 16a	Unidades en mm
Diseño y construcción de una bomba de simulación de flujo cardíaco.		



DETAIL B

SECTION A-A

Autores: Juan Manuel Gallardo Rodríguez Enrique Coboño Sasiambarrena		 Universidad Carlos III de Madrid Departamento de Fluidos
Ingeniería Técnica Industrial, especialidad Mecánica		
Fecha: Septiembre 2009	SIZE: A3	Plano: Tapa interior
Escala: 1:1	Plano nº: 16b	Unidades en mm
Diseño y construcción de una bomba de simulación de flujo cardíaco.		



12. Bibliografía

Libros:

“The Navier-Stokes Equations A Classification of Flows and Exact Solutions” – Philip Drazin and Norman Riley. Año publicación: 2006. Lugar de publicación: Cambridge University Press. Editor: Cambridge University Press.

Proyecto fin de carrera-“Diseño de una bomba programable para simulación de flujo cardíaco” -José Alberto Herrerueta Martín. Año publicación: 2006. Lugar de publicación: Leganés.

Proyecto fin de carrera- “Estudio del flujo en los aneurismas abdominales en la aorta” - Antonio Alonso Rubio. Año publicación: 2004. Lugar de publicación: Leganés.

Proyecto fin de carrera- “Estudio numérico de la fluidodinámica de chorros transitorios con parada impulsiva en la inyección y diferencias de densidad” – Ramón Fernández Aparicio. Año publicación: 2005. Lugar de publicación: Leganés.

Proyecto fin de carrera- “Estudio numérico del movimiento pulsante a la entrada de un conducto” - Abraham Jiménez Berlanga. Año publicación: 2004. Lugar de publicación: Leganés.

Proyecto fin de carrera- “Flujo oscilante en conductos esbeltos de sección variable” - Gabriel García Soriano. Año publicación: 2006. Lugar de publicación: Leganés.

Proyecto fin de carrera- “Simulación del flujo sanguíneo en un aneurisma aórtico abdominal mediante un código comercial de CFD” - Carla Vico Rico. Año publicación: 2004. Lugar de publicación: Leganés.

Proyecto fin de carrera- “Simulación del flujo sanguíneo en un aneurisma sacular” - Sergio González López. Año publicación: 2003. Lugar de publicación: Leganés.

Proyecto fin de carrera- “Simulación en código CFD del flujo sanguíneo como modelo no newtoniano a través de una bifurcación con aneurisma sacular” - Miguel Bastante Valiente. Año publicación: 2005. Lugar de publicación: Leganés.

“Ingeniería química” - J. M. Coulson, J. F. Richardson. Año publicación: 1954. Lugar de publicación: Londres. Editor: Pergamon Press

“Diccionario Mosby Pocket de Medicina, Enfermería y Ciencias de la salud” - Mosby Staff, Mosby. Año publicación: 2004. Cuarta edición. Editor: El Sevier

“Bioquímica Clínica y Patología Molecular” - Fuentes Arderiu, M. J. Castiñeiras Lacambra, J. M. Queraltó Compañó. Año publicación: 1999. Lugar de publicación: Barcelona. Editor: Reverté

“Administración de medicamentos” - Bernardo Santos Ramos, María Dolores Guerrero Aznar. Año publicación: 1994. Lugar de publicación: Madrid. Editor: Díaz de Santos



Web:

<http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/Bombas/PDFs/BOMBAS10.pdf>

<http://books.google.es/books?q=bombas+volum%C3%A9tricas>

<http://books.google.es/books?id=k5aduoRGsakC&pg=PA32&dq=Bombas+de+desplazamiento+positivo+reciprocantes>

http://www.google.es/search?hl=es&ei=dx2MSe_dENWW_ga0ht2vDA&sa=X&oi=spell&resnum=0&ct=result&cd=1&q=Bombas+de+desplazamiento+positivo+reciprocantes&spell=1

<http://books.google.es/books?id=k5aduoRGsakC&pg=PA118&dq=bombas+de+pist%C3%B3n#PPA14,M1>

<http://books.google.es/books?q=bombas+de+pist%C3%B3n>

<http://www.monografias.com/trabajos14/bombas/bombas.shtml#bo>

http://www.armfield.co.uk/esp_fm53_datasheet.html

<http://www.logismarket.es/ip/putzmeister-iberica-bombas-de-embolo-bombas-de-embolo-330701.pdf>

<http://books.google.es/books?id=fVtSTGSIFTtoC&pg=PA184&dq=bombas+de+embolo+de+doble+efecto#PPA184,M1>

<http://books.google.es/books?id=1k3qRVvyFRcC&pg=PT136&dq=bombas+volum%C3%A9tricas#PPT136,M1>

<http://www.blackmer.com/myapp/pdf/110-001s.pdf>

http://www.quiminet.com/ar0/ar_%257C%2518%25BB%25B1%253FD%259B%25B1.htm

http://www.uniovi.es/Areas/Mecanica.Fluidos/docencia/_asignaturas/maquinas_hidraulicas_electricos/Presenta_Oleohid.pdf

<http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/Bombas/PDFs/BOMBAS10.pdf>

http://www.gunt.de/static/s4674_3.php?p1=&p2=&pN=

<http://www.bornemann.com/gesucht-und-schon-gefunden/>

http://www.deutsche-exportdatenbank.de/cl/sid.php?PHPSESSID=mt9171m1ii31til8mq07tq5mem758b4t&f_lang=esp



http://www.deutsche-exportdatenbank.de/cl/sid.php?PHPSESSID=mt9171m1ii31til8mq07tq5mem758b4t&f_lang=esp

<http://books.google.es/books?id=k5aduoRGsakC&pg=PA118&dq=bombas+de+tornillo#PPA118,M1>

<http://books.google.es/books?id=zUlf6RS9zDUC&pg=PA233&dq=bombas+de+tornillo#PPA233,M1>

<http://www.directindustry.es/prod/kral/bomba-de-tornillo-para-aplicaciones-marinas-15343-105237.html>

http://es.wikipedia.org/wiki/Tornillo_de_Arqu%C3%ADmedes

<http://www.directindustry.es/>

<http://www.tecnidos.com/bombashusilloexcentrico.pdf>

<http://www.directindustry.es/cat/bombas-compresores/bombas-centrifugas-R-581.html>

<http://bombascentrifugas.info-tecnica.org/>

http://html.rincondelvago.com/bombas-centrifugas_2.html

http://es.wikipedia.org/wiki/Bomba_centric%C3%ADfuga

<http://www.diee.unican.es/pdf/MF%20T06%20New.pdf>

<http://books.google.es/books?id=1k3qRVvyFRcC&pg=PT136&dq=bombas+volum%C3%A9tricas#PPT136,M1>

<http://books.google.es/books?id=s17g9wa3114C&pg=PA198&dq=bombas+de+diafragma#PPA198,M1>

<http://www.pricast.es/gormanrupp/pdf/AV-05646.pdf>

http://www.bombasindesur.com.ar/info/diafragma_funcion.htm

http://es.wikipedia.org/wiki/Bomba_de_membrana

http://www.quiminet.com/ar9/ar_%253D8Z%2508%253C%2517%258F3.htm

http://www.debem.it/esp/boxer100_es.html

<http://www.nth.com.ar/delrincar.html>

<http://www.jq.com.ar/Imagenes/Productos/Delrin/delrin.htm>

<http://www.electrocome.com/ptecnicos1.htm>



<http://www.general-aislante.com.ar/nylon.htm>

http://www.midsa.com.mx/tablas/prop_delrin.htm

<http://www.electrocome.com/ptecnicos.htm>

http://es.wikipedia.org/wiki/Motor_paso_a_paso_h%C3%ADbrido

http://es.wikipedia.org/wiki/Motor_paso_a_paso

http://es.wikipedia.org/wiki/Motor_de_corriente_continua

http://es.wikipedia.org/wiki/Motor_sin_n%C3%BAcleo

<http://es.wikipedia.org/wiki/Servomotor>

http://es.wikipedia.org/wiki/Motor_el%C3%A9ctrico

<http://www.todorobot.com.ar/documentos/servomotor.pdf>

http://www.sebyc.com/crr/descargas/motores_pap.pdf

<http://www.neoteo.com/motores-paso-a-paso.neo>

<http://www.monografias.com/trabajos17/motor-paso-a-paso/motor-paso-a-paso.shtml>

http://perso.wanadoo.es/luis_ju/ebasica2/mpp_01.html

[http://www.globaldatainternational.com/whitepaper/Norma%20EN%2060529%20\(IP\)%20.pdf](http://www.globaldatainternational.com/whitepaper/Norma%20EN%2060529%20(IP)%20.pdf)

http://www.sebyc.com/crr/descargas/motores_pap.pdf

<http://www.x-robotics.com/motorizacion.htm>

<http://www.epidor.com/>

<http://www.rectificados-rectyafil.es/>