



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

Curso Académico:

RESUMEN

El siguiente Trabajo Fin de Máster, consiste en el modelado de una bomba centrífuga comercial, a la que se le aplicará una serie de métodos para su análisis y mejora. Este, se explicará a lo largo de la memoria, detallando el proceso de diseño y ensamblado de todas las partes de la máquina. Posteriormente, se tratará la parametrización de uno de sus componentes, para después realizar una simulación dinámica, comprobando el correcto funcionamiento del modelo y los esfuerzos ocasionados. Después, con las fuerzas y momentos calculados, se aplicará al eje el método de los elementos finitos para conocer el estado tensorial y deformación en régimen permanente. Por último, para cerrar el Trabajo Final de Máster, se elaborará una simulación del fluido en velocidad y presiones, para alcanzar las conclusiones del modelo.

Para la primera parte, que incluye el prototipado virtual y su análisis, se ha utilizado el software Inventor Profesional 2014, perteneciente a la marca comercial Autodesk Inc. Dicho programa, ha sido tratado a lo largo del Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales y en el Máster Universitario de Ingeniería Industrial, en la especialidad de Diseño y fabricación de producto. Para la parte de simulación del fluido, se va a utilizar el software Ansys 15.0, el cual fue usado en la asignatura del grado Tecnología de Máquinas. Además, para la ejecución del proyecto, se han necesitado diversos conocimientos adquiridos lo largo de la etapa universitaria. Entre ellos, cabe destacar máquinas hidráulicas, dinámica de fluidos o resistencia y elasticidad de los materiales.

PALABRAS CLAVE: CAD 3D, Prototipo virtual, FEM, Parametrización, CFD

ABSTRACT

The following Master Thesis consists of modelling a centrifugal pump from current market, which will be analysed and improved using different methods. This MT will be described in depth throughout the report, detailing the modelling and the assembly process. Subsequently, the parametrization of one part of the machine will be covered. Besides, the assembly has been tested by means of a dynamic simulation in order to validate its normal operation and to know the strains of the model. Then, the shift has been analysed with the Finite Element Method to find out the stress state and deformations under steady regime. Finally, a fluid simulation has been carried out to estimate its pressure and velocity.

For the first part of this Master Thesis, which includes virtual prototyping and its analysis, Inventor Professional 2014 has been applied. This CAD application has been used during Industrial Technology Degree and Industrial Engineering Master in the area of Product Design and Manufacturing. For the second part Ansys 15.0 has been used, software taught on Machine technology course. Furthermore, other skills gained at university period have been used, such as hydraulic machines, fluid dynamics or resistance and elasticity of materials.

KEYWORDS: CAD 3D, Virtual prototype, FEM, Parametrization, CFD

ÍNDICE DEL TFM

Documentos Contenidos en el TFM

- **Memoria**
- **Presupuesto**
- **Anexos**

Índice de la Memoria

1.	ALCANCE Y OBJETIVOS	3
2.	CONTEXTO HISTÓRICO Y TECNOLÓGICO DE LAS MÁQUINAS HIDRÁULICAS	4
2.1	Historia	4
2.2	Definición y clasificación de las máquinas hidráulicas	5
2.2.1	Máquinas de desplazamiento positivo.....	5
2.2.2	Turbomáquinas.....	6
3.	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LAS MÁQUINAS HIDRÁULICAS	7
3.1	Desarrollo teórico.....	7
3.2	Condiciones reales de las bombas centrífugas	9
4.	ELEMENTOS PRINCIPALES DE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS	11
4.1	Carcasa o voluta	11
4.2	Rodete	11
4.3	Eje	12
4.4	Anillo de desgaste	12
4.5	Cierre Hidráulico.....	13
5.	SELECCIÓN DE UNA BOMBA COMERCIAL	15
6.	MODELADO DE LA BOMBA CENTRÍFUGA.....	17
6.1	Obtención de las medidas para el modelado.....	17
6.2	Modelado CAD con Inventor	18
6.2.1	Carcasa	18
6.2.2	Caja de rodamientos	24
6.2.3	Rodete	26
6.2.4	Eje	27
6.2.5	Tapa de rodamientos	29

6.2.6 Brida intermedia.....	29
6.2.7 Piezas que completan el modelo.....	30
7. PARAMETRIZACIÓN	32
8. ENSAMBLAJE COMPLETO DEL MODELO	40
9. SIMULACION DINAMICA DE LA BOMBA CENTRÍFUGA.....	46
9.1 Montaje simplificado mediante uniones.....	46
9.2 Creación de uniones en la Simulación Dinámica.....	48
9.3 Creación de las condiciones de contorno	49
9.4 Simulación y análisis de la simulación dinámica	55
10. ANÁLISIS TENSORIAL POR ELEMENTOS FINITOS	57
11. SIMULACIÓN DEL FLUIDO MEDIANTE ANSYS 15.0.....	63
11.1 Modelado del flujo	64
11.2 Desarrollo del análisis.....	65
11.2.1 Geometría (<i>Geometry</i>)	66
11.2.2 Mallado (<i>Mesh</i>)	67
11.2.3 Configuración (<i>Setup</i>).....	68
11.2.4 Resolución (<i>Solution</i>).....	74
11.2.5 Resultado (<i>Results</i>).....	76
12. CONCLUSIONES	80
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	81
LISTA DE FIGURAS.....	82

Índice del Presupuesto

1. DESCRIPCIÓN DE LAS UNIDADES DE TRABAJO.....	2
2. CUADRO DE PRECIOS DESCOMPUESTOS.....	4
3. RESUMEN POR CAPÍTULOS.....	7
4. PRESUPUESTO TOTAL.....	8

Índice de Anexos

1.	ABREVIATURAS, SIMBOLOGÍA Y VARIABLES	2
2.	PLANOS.....	4
2.1	Plano de conjunto	5
2.2	Voluta	6
2.3	Eje	7
2.4	Rodete	8
2.5	Brida intermedia.....	9
2.6	Anillo de desgaste y Estopa	10
2.7	Anillo linterna	11
2.8	Casquillo para eje	12
2.9	Prensaestopas	13
2.10	Caja de rodamientos.....	14
2.11	Tapa de rodamientos.....	15
2.12	Pie	16

TRABAJO FIN DE MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

MEMORIA

**DISEÑO DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA MEDIANTE LA GENERACIÓN DE SU
PROTOTIPO VIRTUAL. SIMULACIÓN DINÁMICA, FEM, CRACIÓN DE SU FAMILIA
DE PIEZAS Y SIMULACIÓN DEL FLUIDO.**

Sergio Garrido Martínez

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1.	ALCANCE Y OBJETIVOS	3
2.	CONTEXTO HISTÓRICO Y TECNOLÓGICO DE LAS MÁQUINAS HIDRÁULICAS	4
2.1	Historia	4
2.2	Definición y clasificación de las máquinas hidráulicas	5
2.2.1	Máquinas de desplazamiento positivo.....	5
2.2.2	Turbomáquinas.....	6
3.	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LAS MÁQUINAS HIDRÁULICAS	7
3.1	Desarrollo teórico.....	7
3.2	Condiciones reales de las bombas centrífugas	9
4.	ELEMENTOS PRINCIPALES DE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS	11
4.1	Carcasa o voluta	11
4.2	Rodete	11
4.3	Eje	12
4.4	Anillo de desgaste	12
4.5	Cierre Hidráulico.....	13
5.	SELECCIÓN DE UNA BOMBA COMERCIAL	15
6.	MODELADO DE LA BOMBA CENTRÍFUGA.....	17
6.1	Obtención de las medidas para el modelado.....	17
6.2	Modelado CAD con Inventor	18
6.2.1	Carcasa	18
6.2.2	Caja de rodamientos	24
6.2.3	Rodete	26
6.2.4	Eje	27
6.2.5	Tapa de rodamientos	29
6.2.6	Brida intermedia.....	29
6.2.7	Piezas que completan el modelo.....	30
7.	Parametrización.....	32
8.	ENSAMBLAJE COMPLETO DEL MODELO	40
9.	SIMULACION DINAMICA DE LA BOMBA CENTRÍFUGA.....	46

9.1	Montaje simplificado mediante uniones.....	46
9.2	Creación de uniones en la Simulación Dinámica.....	48
9.3	Creación de las condiciones de contorno	49
9.4	Simulación y análisis de la simulación dinámica	55
10.	ANÁLISIS TENSORIAL POR ELEMENTOS FINITOS	57
11.	SIMULACIÓN DEL FLUIDO MEDIANTE ANSYS 15.0	63
11.1	Modelado del flujo	64
11.2	Desarrollo del análisis.....	65
11.2.1	Geometría (Geometry)	66
11.2.2	Mallado (Mesh)	67
11.2.3	Configuración (Setup).....	68
11.2.4	Resolución (Solution).....	74
11.2.5	Resultado (Results).....	76
12.	CONCLUSIONES	80
	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	80
	LISTA DE FIGURAS.....	82

1. ALCANCE Y OBJETIVOS

En el siguiente Trabajo Fin de Máster, se pretende abordar un problema concreto a través de los conocimientos adquiridos durante el desarrollo de los estudios de Ingeniería Industrial. Para ello, se realizará el diseño y análisis de un elemento que es de gran uso tanto en el ámbito de la industria como en entorno doméstico, se trata de una bomba centrífuga, utilizada para impulsar agua limpia.

Tras el modelado de todos los componentes se realizará un estudio las fuerzas y momentos ocasionados en su punto óptimo de trabajo, así como un análisis de las tensiones acumuladas en el eje mediante el Método de los Elementos Finitos.

Además, se ha querido ir más allá, modelando una de sus partes de forma paramétrica. Herramienta especialmente útil a la hora de crear familias de piezas. Este caso es un claro ejemplo de su uso, ya que dentro de un mismo modelo de bomba, existe un gran número piezas con diferentes medidas geométricas. Facilitando el análisis de todas ellas con un único modelado.

Por último, se estudiará el comportamiento del fluido dentro de la bomba, en su paso por el rodete y la voluta, analizando la presión que se alcanza y su velocidad. Dicho ensayo se abordará con el programa Ansys 15.0.

2. CONTEXTO HISTÓRICO Y TECNOLÓGICO DE LAS MÁQUINAS HIDRÁULICAS

2.1 Historia

Desde la antigüedad, el hombre en su empeño por magnificar la fuerza e intentar controlar los acontecimientos naturales, ha ideado sistemas que permiten realizar grandes esfuerzos de forma simple. Aire y agua son dos de los fluidos con los que el ser humano más ha interactuado a lo largo de la historia, siendo fundamentales para la continuidad de la especie.

En la antigua Mesopotamia, con la civilización Sumeria, aparecieron las primeras creaciones hidráulicas para intentar aprovechar los beneficios de los fluidos. Con ellos, surgieron los sistemas de canalizaciones de agua o presas, con los que se consiguió dar un impulso a la agricultura local. Posteriormente en la misma región, alrededor del siglo III a.C, aparecerían elementos como las máquinas de eje vertical que aprovecharían la energía eólica (molinos de viento), así como, las primeras ruedas hidráulicas, utilizadas para transformar la energía que trae el agua en energía mecánica de forma empírica.

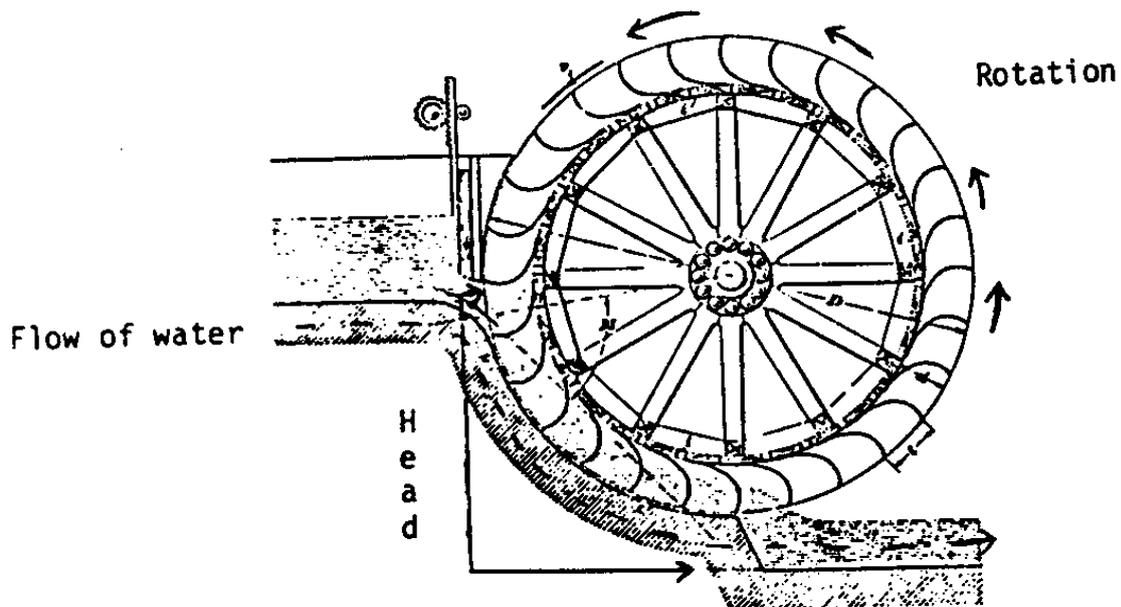


Figura 2-1. Rueda hidráulica (Fuente: "www.cd3wd.com")

Con el paso del tiempo, se han ido perfeccionando cada vez más los mecanismos utilizados, dotándolos de sistemas más complejos y sofisticados. Ayudando a la causa, autores y científicos tan relevantes como Leonardo Da Vinci, Galileo, Pascal, Newton, Bernoulli, Euler o Braham entre muchos otros han sido artífices de lo que hoy se conoce por máquina hidráulica.

2.2 Definición y clasificación de las máquinas hidráulicas

Una máquina, es un conjunto de mecanismos que transforman la energía. Las máquinas hidráulicas son aquellas en las que un fluido atraviesa el sistema para suministrar energía a través de aquella que absorbe (turbinas), o bien para restituir al fluido la energía mecánica que adquiere (bombas).

En este caso, el trabajo se centrará en aquellas máquinas hidráulicas que absorben una energía motriz para dársela al fluido. En este ámbito, es posible encontrar dos tipos en función del principio de funcionamiento que las rigen: turbomáquinas y máquinas de desplazamiento positivo.

2.2.1 Máquinas de desplazamiento positivo

Las máquinas de desplazamiento positivo engloban diferentes tipos de morfología como son las máquinas de membrana, rotativas, paletas, émbolo, engranajes, etc. Pero todas ellas tienen un denominador en común, el “principio de funcionamiento positivo”. En ellas, el fluido cambia sus condiciones debido a una disminución volumétrica de la cavidad que los acoge, experimentando variaciones de presión cuando este es compresible. En la *Figura 2.2* es posible ver una bomba de embolo, la cual funciona con un pistón que comprime el fluido alojado en la cavidad interna. En la *Figura 2.3* se ilustra una bomba de engranajes, que utiliza estos elementos mecánicos para el mismo fin.

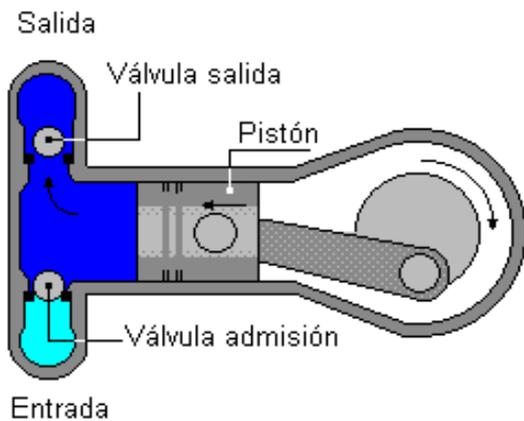


Figura 2-2. Bomba de embolo
(Fuente: "<https://fr.wikibooks.org/wiki/Pompes>)

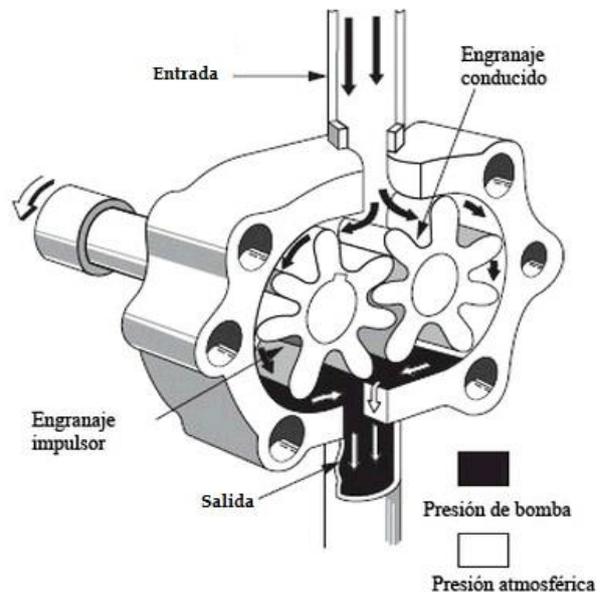


Figura 2-3. Bomba de engranajes
(Fuente: "<http://industrial-automatca.blogspot.com>")

2.2.2 Turbomáquinas

Las turbomáquinas en cambio, son aquellas que se basan en la ecuación de Euler como principio básico de funcionamiento, es decir, el intercambio de energía se propicia gracias a la variación del momento cinético del fluido. Esto ocurre gracias a la rotación de unos álabes o paletas que forman la parte móvil de la máquina, el rotor.

Las turbomáquinas, pueden ser clasificadas de dos formas diferentes, Por un lado, en función del trato con la energía:

- Generadoras, en las que el rodete cede energía al fluido (bombas, ventiladores, etc.)
- Motoras, donde es el fluido el que cede la energía al elemento rotatorio de la bomba (turbinas eólicas, motores hidráulicos, etc.)

Por otro lado, en función de la dirección del flujo, se pueden clasificar en:

- Centrífugas, donde todas las partículas de fluido, recorren el rodete a través de una trayectoria situada en un plano transversal al eje de la máquina.
- Axiales, donde todas las partículas de fluido, recorren el rodete a través de una trayectoria situada en un cilindro coaxial al eje de la máquina.
- Helicocentrífugas, donde las partículas, recorren el rodete a través de una trayectoria cónica.

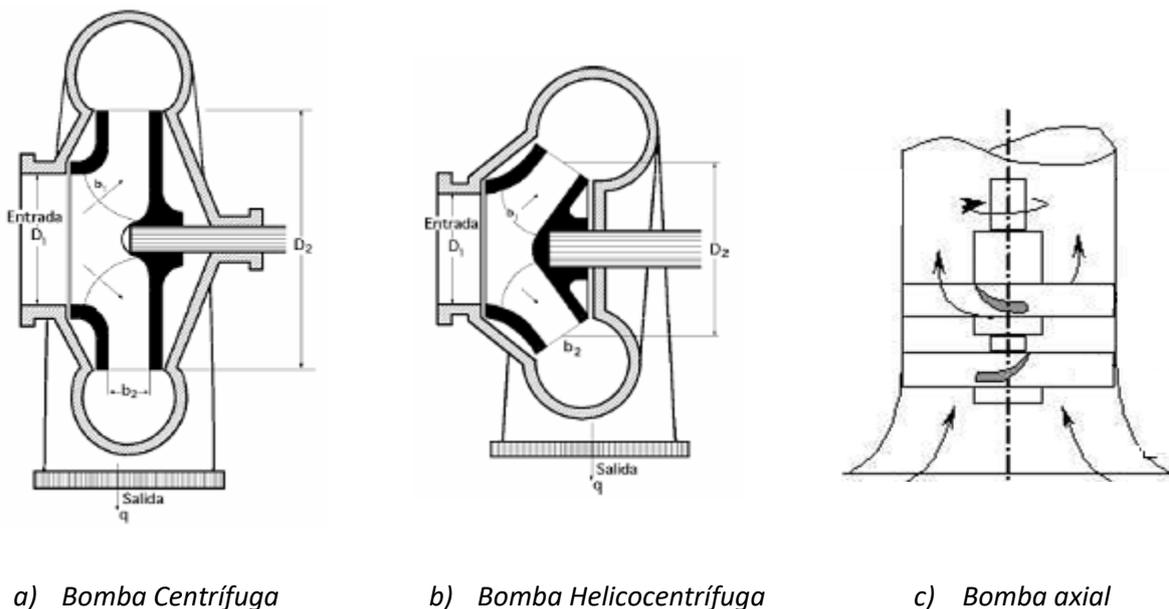


Figura 2-4. Clasificación según dirección de flujo (Fuente: <http://ocwus.us.es>)

3. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LAS MÁQUINAS HIDRÁULICAS

3.1 Desarrollo teórico

La Ecuación general de las Máquinas Hidráulicas o Ecuación de Euler está basada en el Teorema de Conservación del Momento Cinético, pues es el principio físico que está detrás de cualquier objeto que gire al ser atravesado por un fluido.

Para comprender el funcionamiento de la máquina estudiada, es necesario introducir el concepto de los triángulos de velocidad, que se generan en los álabes del rodete. En ellos, se muestra la velocidad que toma al fluido en el rodete de forma descompuesta, dividiéndose en tres componentes:

- w : Velocidad relativa del fluido respecto al rodete.
- u : Velocidad lineal del rotor, que equivale a la velocidad de arrastre debida a la rotación del rodete.
- v : Velocidad absoluta del fluido.

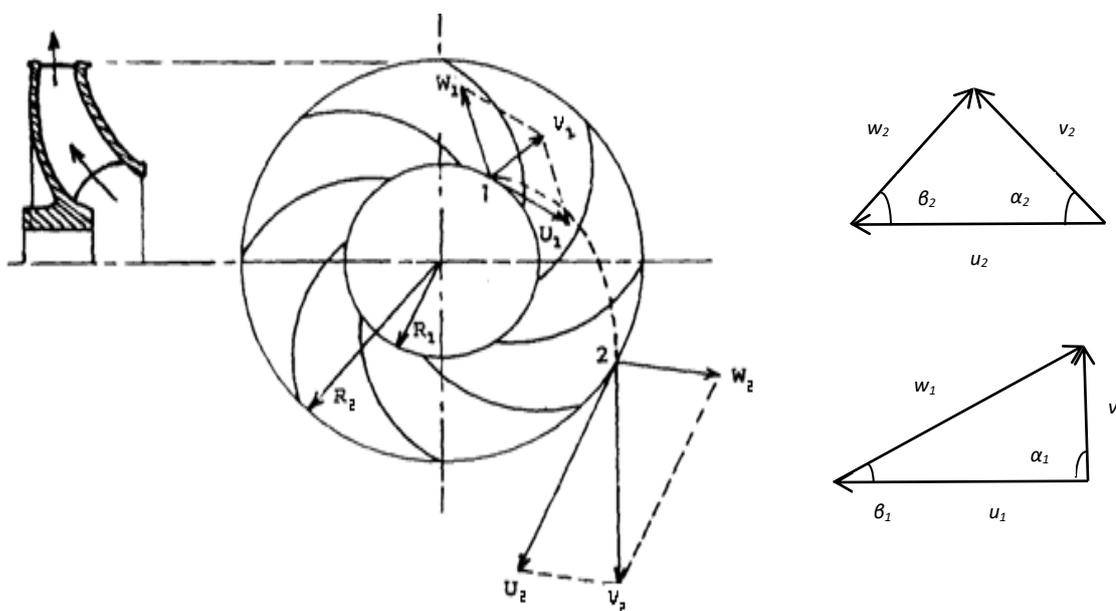


Figura 3-1. Triángulos de velocidad a la entrada y salida del álabe

Una vez conocido el concepto de triángulos de velocidad, se va a proceder a desarrollar la teoría del momento cinético, suponiendo que se trata de un fluido incompresible ($\rho = cte$), que se encuentra en régimen permanente y que en el rodete existe un número infinito de álabes, lo que conllevaría a que todos los triángulos de velocidad son iguales en los puntos que tienen el mismo radio.

El momento cinético es una propiedad vectorial cuya ecuación de conservación, se puede obtener aplicando el teorema de arrastre de Reynolds, visto durante los estudios de grado. Quedando así que $\overline{H_{Sist}} = (\vec{r} \wedge m\vec{v})_{Sist}$

Con ello, la conservación del momento cinético, se presenta como que la derivada de dicho momento con el tiempo, es igual a la suma de todos los momentos exteriores aplicados en el volumen de control, es decir:

$$\frac{d(\vec{r} \wedge m\vec{v})_{sist}}{dt} = \sum \vec{M}_{ext}$$

En este caso, el volumen de control es el rodete. Desarrollando la expresión con los términos local y convectivo, se alcanza la expresión:

$$\sum \vec{M}_{ext} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{VC} d\vec{M}_c + \iint_{SC} \rho[\vec{r} \wedge \vec{v}](\vec{v} \cdot d\vec{A})$$

En régimen permanente, las propiedades no experimentan cambio alguno en el interior del VC, es por ello que se puede eliminar el primer término de la ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{VC} d\vec{M}_c = 0$$

Los momentos exteriores que actúan en la bomba centrífuga, se resumen únicamente en el par generado por el motor eléctrico acoplado a esta. Sabiendo que este es un par motor y que el rodete tiene un número infinito de álabes como se definió inicialmente, se propicia que el flujo sea uniforme tanto en la entrada como en la salida, así se tiene que:

$$M_{motor}\vec{k} = [\vec{r} \wedge \vec{v}]_1 \iint_{\Sigma_1} \rho(\vec{v} \cdot d\vec{A}) + [\vec{r} \wedge \vec{v}]_2 \iint_{\Sigma_2} \rho(\vec{v} \cdot d\vec{A})$$

Ahora, la velocidad absoluta será descompuesta en su componente radial v_m y su componente tangencial v_u como es posible ver en la figura.

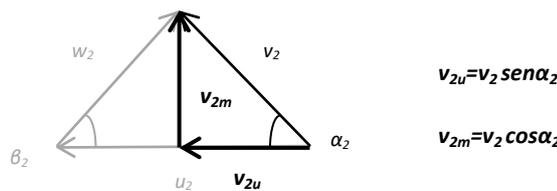


Figura 3-2. Descomposición de la velocidad absoluta

Entonces,

$$\iint_{\Sigma_1} (\vec{v} \cdot d\vec{A}) = v \cdot A \cdot \operatorname{cos} \nu A = (v \operatorname{sen} \alpha)(A) = v_m A = Q_r$$

Conociendo que es un fluido incompresible y por tanto que la densidad es constante, sustituyendo se tiene que:

$$M_{motor}\vec{k} = \rho Q_r ([\vec{r} \wedge \vec{v}]_2 - [\vec{r} \wedge \vec{v}]_1)$$

Del triángulo de velocidades, es posible alcanzar finalmente el teorema de Euler de las turbomáquinas hidráulicas aplicado al rodete, quedando de la siguiente forma:

$$M_{rodete} \vec{k} = \rho Q_r (r_1 v_{1u} - r_2 v_{2u})$$

3.2 Condiciones reales de las bombas centrífugas

Cabe destacar que toda esta teoría se ha desarrollado para unas condiciones ideales en las que el número de álabes es infinito, pero en la realidad, el rodete dispone de una cantidad de álabes estipulada por diseño, lo que provoca que el ángulo β_2 no sea el mismo a lo largo de la superficie de salida del impulsor. Esto incurrirá en unas pérdidas hidráulicas debidas a la desviación que sufre el fluido entre álabes, que en apartados posteriores se ha solucionado aplicando la teoría de Pfleiderer.

Además de las pérdidas hidráulicas, existen otros tipos de pérdidas denominadas volumétricas, las cuales corresponden a las fugas de fluido al pasar de un elemento fijo a otro móvil. Estas pérdidas se intentan reducir al máximo con la aplicación de cierres hidráulicos y sellos mecánicos.

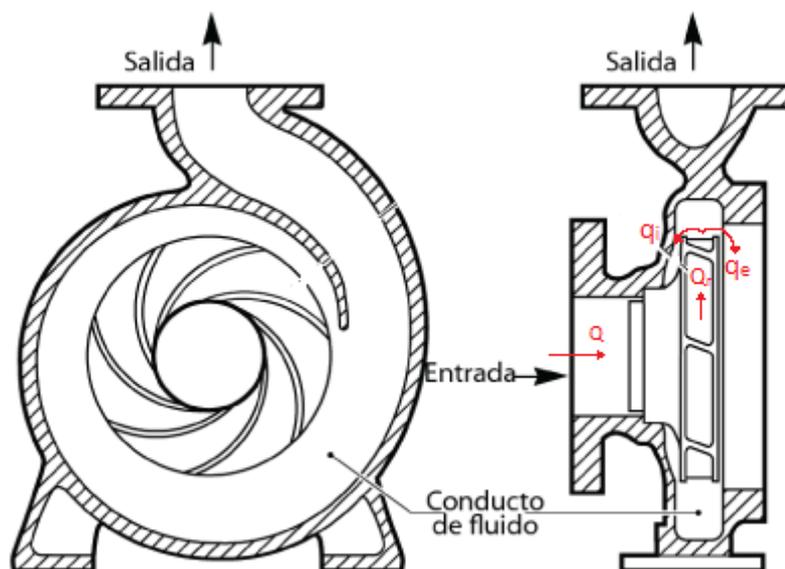


Figura 3-3. Pérdidas de flujo (Fuente: <http://www.editores-srl.com.ar>)

Como se puede observar de la Figura, $Q = Q_r + q_e + q_i$ donde “ q_e ” son las fugas externas que se intentan paliar con sellos mecánicos y “ q_i ” son las fugas internas, minimizadas con los cierres hidráulicos.

Por último, existen una serie de pérdidas mecánicas debidas al rozamientos entre los distintos componente de la bomba, que generan fricciones. En la *Figura 3.4* se puede ver como varía la gráfica H-Q desde la situación ideal, restando todas las pérdidas producidas.

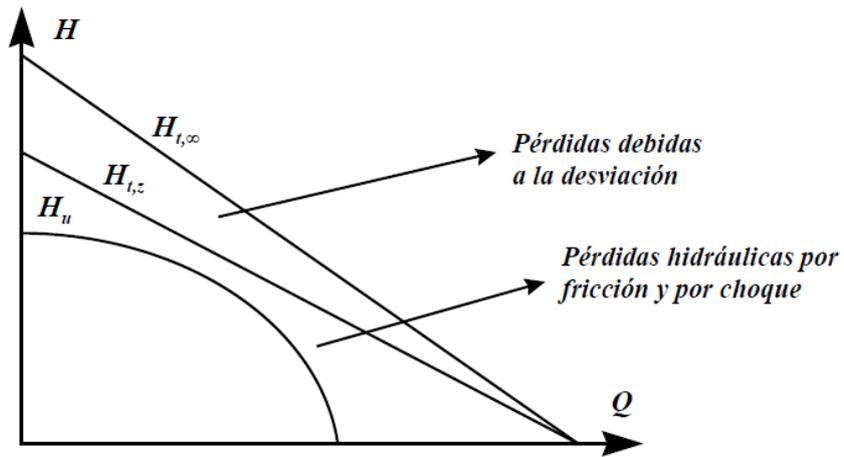


Figura 3-4. Gráfica Q-H de las pérdidas en la bomba. (Fuente: "G. López Patiño, F.J. Martínez (1999). Máquinas Hidráulicas")

4. ELEMENTOS PRINCIPALES DE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS

4.1 Carcasa o voluta

La carcasa o caja de la bomba de voluta, es una de las principales partes de la bomba centrífuga. Esta rodea al impulsor o rodete y tiene forma de espiral. Esta pieza dirige el fluido proveniente del difusor para transformar la energía de velocidad en energía potencial. En una bomba centrífuga, la voluta debe aumentar la sección a medida que se avanza en la espiral hasta llegar a una abertura final en la cual el fluido es descargado al sistema.



Figura 4-1. Carcasa de bomba centrífuga (Fuente: "www.directindustry.it")

4.2 Rodete

El rodete es la pieza clave en la bomba centrífuga. Este es la parte móvil y su principal función es hacer girar el fluido, propiciando así la elevación de presión de la bomba. El disco está siempre orientado de forma perpendicular a la circulación del fluido y dispone de un número determinado de álabes curvados, los cuales tienen dirección opuesta al giro del eje. El rendimiento hidráulico de la bomba dependerá en gran medida del diseño de este componente.

Existen varios tipos de rodetes en función del componente que trasiegan. Estos pueden ser:

- **Abiertos:** No disponen de paredes laterales. Son utilizados para impulsar fluidos que pueden contener impurezas, pues permite el paso de éstas. Su principal desventaja es el bajo rendimiento que obtienen.
- **Cerrados:** Están compuestos por los álabes y discos unidos en sus laterales de forma que dirigen el flujo a través de sus paredes. Este tipo de impulsores es utilizado para empujar fluidos limpios como sería el caso. Este tipo de impulsor es el que tiene mayor rendimiento.

- Semiabiertos: Es un componente híbrido entre los dos anteriores.

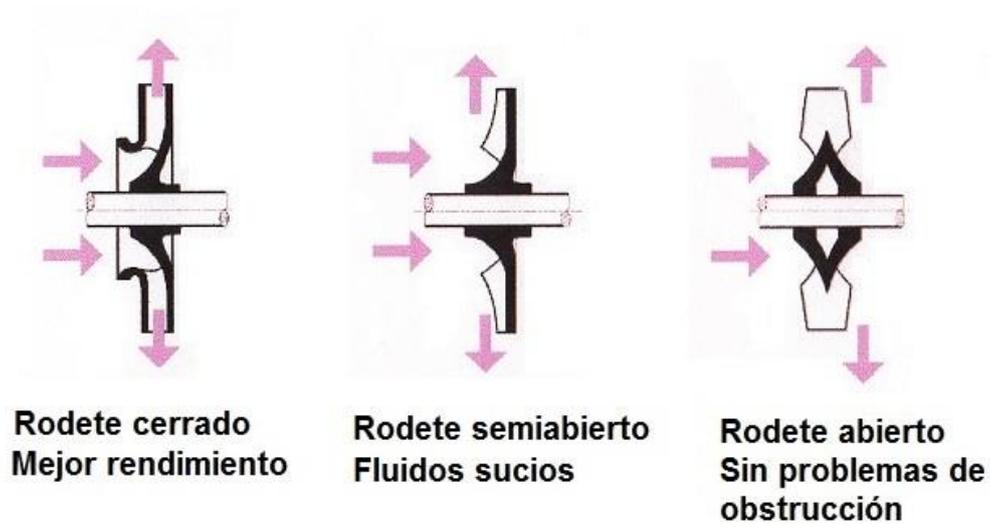


Figura 4-2. Clasificación de los rodetes (Fuente: <http://ingemecanica.com/>)

4.3 Eje

El eje es el elemento motor de la bomba hidráulica. Este gira a la velocidad de diseño gracias a su acoplamiento con un motor eléctrico. Es esta energía eléctrica transformada en energía de velocidad la que se encarga de mover el rodete mediante una chaveta que acopla ambas piezas.

4.4 Anillo de desgaste

El anillo de desgaste sirve de junta entre la carcasa y el rodete. Este es fácil de cambiar y debe ser económico. Estas partes son utilizadas para impedir las pérdidas volumétricas entre las partes fijas y móviles de la bomba. Aun incorporando estos tipos de anillos, el caudal de fugas no se puede reducir a cero, siempre se tendrá una pequeña cantidad de escapes, lo que origina un rendimiento volumétrico de la bomba. Por lo tanto, es conveniente que estas pérdidas se reduzcan al mínimo. Es por ello por lo que existen anillos de formas muy diversas, con laberintos que aumentan la resistencia del conducto. En el caso de estudio, el tipo de cierre es simple de forma recta.

Normalmente las bombas centrífugas disponen de dos anillos de desgaste, uno fijo al disco anterior del rodete y otro a la voluta. Para evitar que se gripe el impulsor, se construyen de materiales distintos. En la *Figura 4.3*, es posible observar los diferentes tipos de cierres que existen.

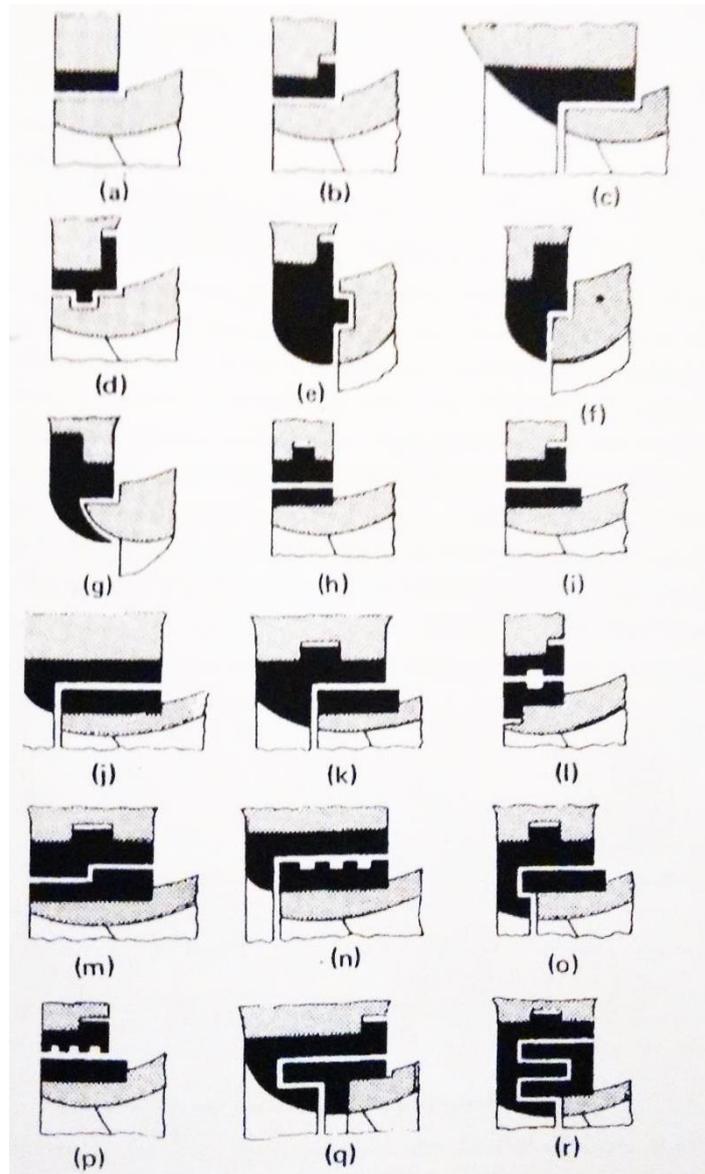


Figura 4-3. Morfologías de los anillos de desgaste (Fuente: "G. López Patiño, F.J. Martínez (1999). Máquinas Hidráulicas")

4.5 Cierre Hidráulico

La función principal de este componente es conseguir que no existan fugas externas, así como, asegurar que no se produce un gran rozamiento mecánico sobre el eje. El prensaestopas común, está formado por los siguientes componentes:

- **Empaquetadura:** Esta es prensada para evitar las fugas de fluido. Normalmente, está compuesta por fibras animales, vegetales o sintéticas debidamente presionadas. Pero también existen empaquetaduras metálicas fabricadas de plomo o aluminio, donde el núcleo es elástico. La empaquetadura, cuando se fabrica, es introducida en algún lubricante para intentar reducir al máximo el rozamiento con el eje.

- Prensaestopas: Este presiona la empaquetadura mediante el apriete de tornillos, disminuyendo el juego entre el eje y la carcasa.
- Anillo linterna: Este componente tiene forma de H y está situado en medio de dos empaquetaduras. Es utilizado en bombas que trasiegan fluidos peligrosos. Dispone de un orificio el cual se conecta mediante una tubería a la carcasa, lo que sirve para introducir por el agujero un fluido de seguridad que disolvería una posible fuga de líquido. El mayor inconveniente de este componente es que necesita un alineamiento constante del agujero con una parte de la carcasa, con los costes de mantenimiento que esto ocasiona.

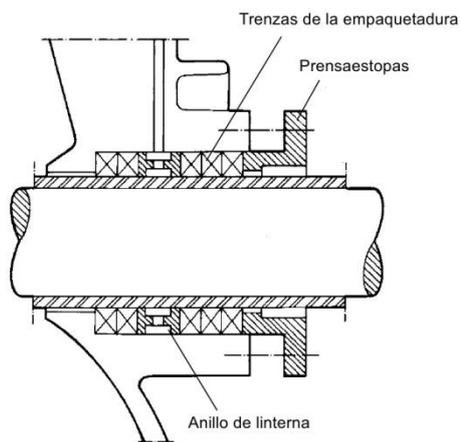


Figura 4-4. Esquema de cierre hidráulico (Fuente: <https://areamecanica.files.wordpress.com>)



Figura 4-5. Anillos linterna (Fuente: <http://slurrypumpmexico.com/>)

5. SELECCIÓN DE UNA BOMBA COMERCIAL

Para el desarrollo del presente trabajo académico, en primer lugar se ha realizado una búsqueda de las diferentes bombas comerciales existentes. Dando un barrido al mercado de las maquinas hidráulicas, se ha observado que existen gran variedad de marcas y modelos ofertados, así como de dimensiones. Por lo general, en los catálogos de bombas, se dan datos básicos del funcionamiento, los regímenes que alcanzan y dimensiones principales, pero como es lógico, es imposible encontrar planos de máquinas que están en el mercado. Finalmente, se ha escogido trabajar con la bomba de la marca Kirloskar, tipo DB 80/20. El principal motivo que ha llevado a elegir esta marca es la oferta de un catálogo numerando todos los componentes de los que dispone y una vista explotada de ellos. Además, da información sobre los materiales de los componentes y vistas detalladas del cierre hidráulico. En la siguientes figura, es posible ver una foto real de la bomba modelada y su diagrama H-Q.



Figura 5-1. Bomba comercial Kirloskar Modelo-DB (Fuente: <http://www.kirloskarpumps.com>)

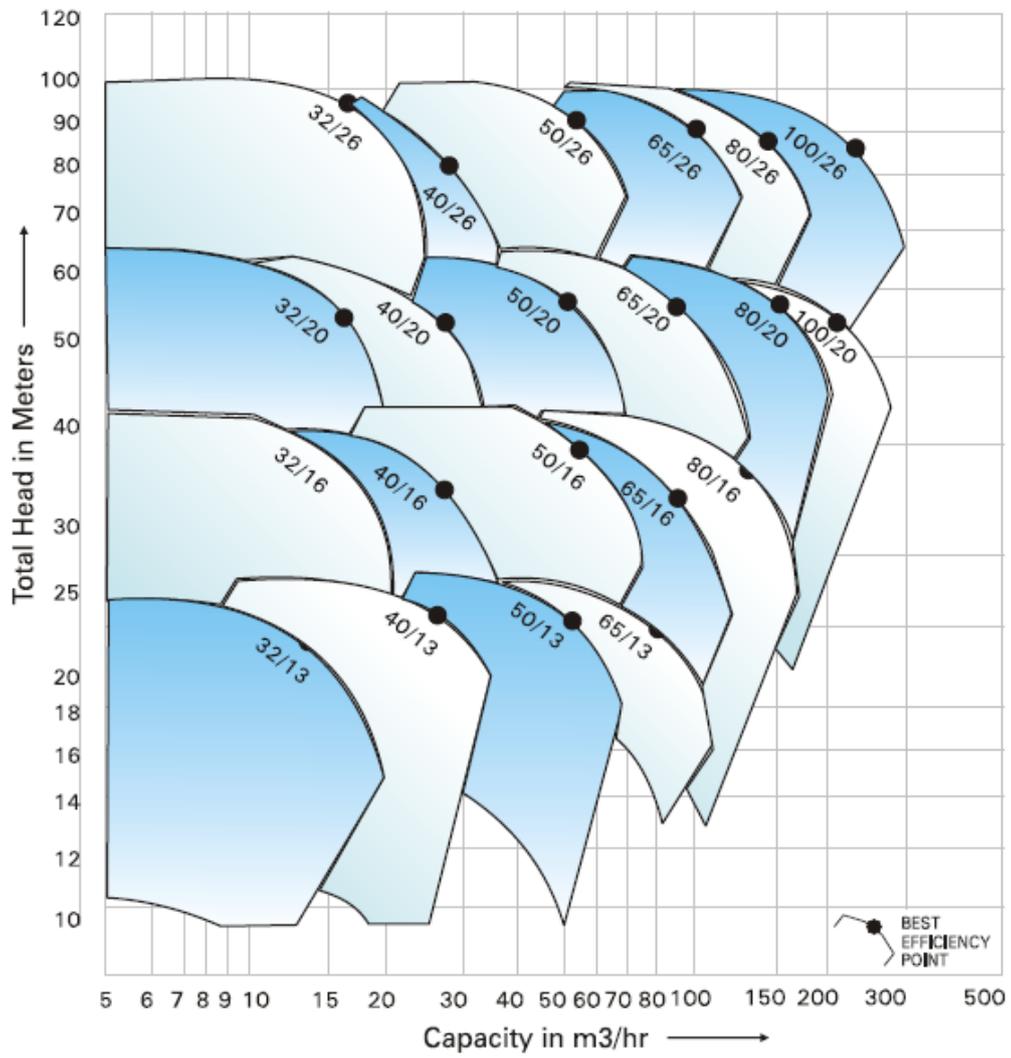


Figura 5-2. Curvas Q-H para el modelo DB a 2900 rpm, obtenidas del catálogo Kirloskar-DB (Fuente: <http://www.kirloskarpumps.com>)

6. MODELADO DE LA BOMBA CENTRÍFUGA

6.1 Obtención de las medidas para el modelado

Queriendo ser lo más preciso a la hora de reproducir el diseño de la bomba y con la carencia de disponer de planos para ello, se ha ideado un método por el cual se obtienen las medidas de las diferentes partes con el software AutoCad. Como se comentó anteriormente, el proveedor en su catálogo ofrece una vista seccionada con la numeración de las diferentes partes del sistema. Además, proporciona una serie de medidas principales que serán usadas de referencia a la hora de modelar la máquina como se ve en la *Figura 6.1*.

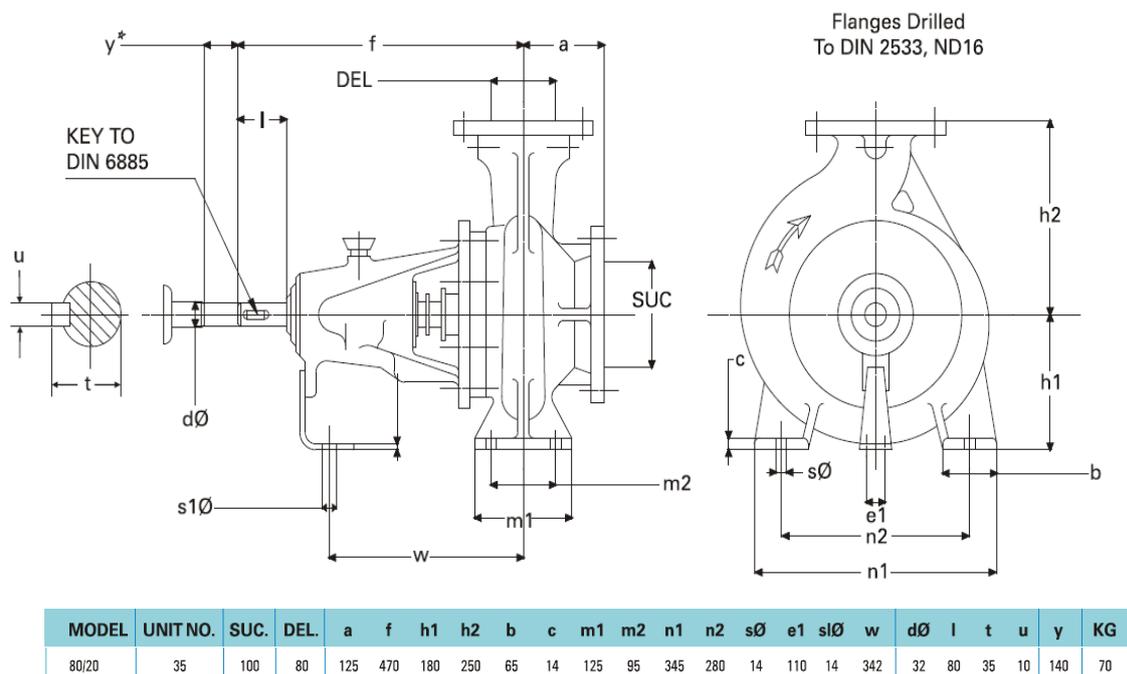


Figura 6-1. Esquema de la bomba con las medidas de los parámetros principales, catálogo Kirloskar-DB (Fuente: <http://www.kirloskarpumps.com>)

Una vez se tienen claras las medidas principales que componen la bomba, se trasladará la vista seccionada del catálogo a AutoCad y será escalada para conseguir dichas medidas. Cuando se alcanzan, se ira dibujando y acotando la sección para obtener todas las demás.

Para tener un orden en el dibujo, se utilizarán diferentes capas a la hora de marcar las cotas del modelo, separando por componentes las diferentes capas. De este modo se han obtenido todas las dimensiones de una forma precisa.

Cabe destacar que en Inventor, se han redondeado todas las cotas en la medida de lo posible, no dejando una longitud irrelevante para el funcionamiento con dos decimales, ya que esto no afecta la mecánica del sistema y hace más densos los planos.

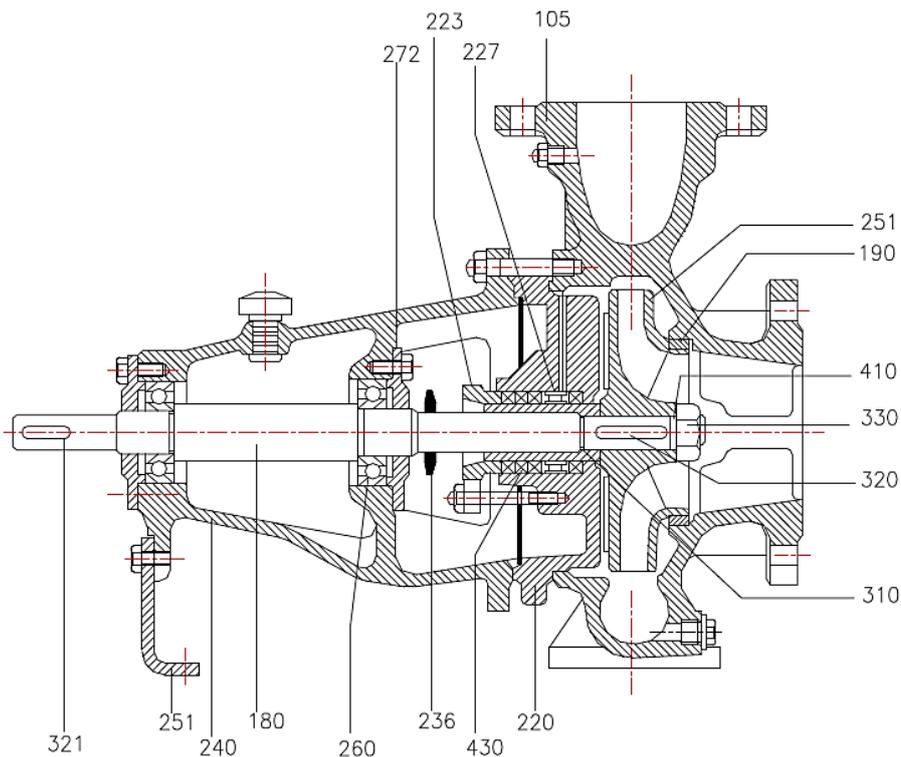


Figura 6-2. Vista seccionada de la bomba, catálogo Kirloskar-DB
(Fuente: <http://www.kirloskarpumps.com>)

6.2 Modelado CAD con Inventor

Para comenzar, siempre es recomendable una buena organización de todos los elementos con los que se va a trabajar. Por ello, en primer lugar se ha de crear un proyecto en el cual se pueda acceder rápidamente a las piezas que se está modelando.

Una vez creado el proyecto, se selecciona la opción *Normal.ipt*, para generar una nueva parte. Como norma general, siempre es aconsejable ir proyectando aquellas geometrías (planos principales, aristas de piezas) en los bocetos de trabajo, para así poder restringir por completo los dibujos de la forma más sencilla y funcional posible.

6.2.1 Carcasa

La carcasa es la parte más compleja de la bomba, y por tanto la más complicada de modelar. Para ello hay que utilizar herramientas como la elevación o la combinación de sólidos para conseguir la geometría deseada, herramientas que no suelen ser comunes en diseños sencillos. El proceso de modelado en Inventor para la carcasa es el siguiente:

En primer lugar, se va a proceder a crear la forma del caracol que conduce el fluido (parte interior del difusor), a continuación se modelará la voluta correspondiente a la parte exterior de la carcasa y se restarán los volúmenes para obtener el perfil deseado, con el espesor correspondiente.

Posteriormente se irán añadiendo características a la pieza para completar el modelo como son: los embrizados de entrada y salida del fluido, soportes, etc.

Para modelar el componente, en primer lugar se genera un boceto en uno de los planos principales del entorno y en él se dibuja una circunferencia de radio 40 mm a una distancia de 110 mm del origen. A continuación, se le aplica la herramienta bobina para crear la espiral que conducirá el fluido a través de la carcasa. Dicha espiral tiene un de paso 50 mm y esta revolucionada 7/8.

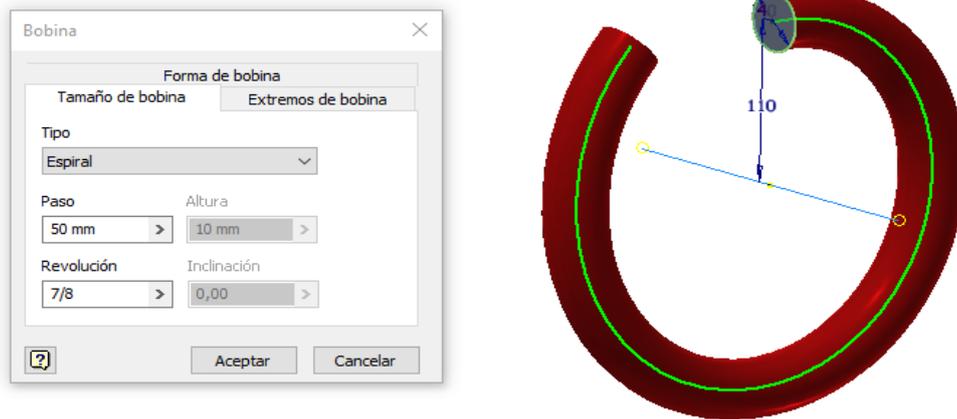


Figura 6-3 Generación de espiral

Seguidamente, como se quiere que la espiral vaya aumentando el diámetro a medida que avanza el fluido, es necesario practicar una solevación para conseguirlo. Para ello se realizará varios bocetos a lo largo de la espiral y se irá aumentando paulatinamente el tamaño del diámetro. Estos bocetos estarán realizados en los planos principales a excepción del que esté sobre el final de la solevación como se muestra en la Figura 6.4.

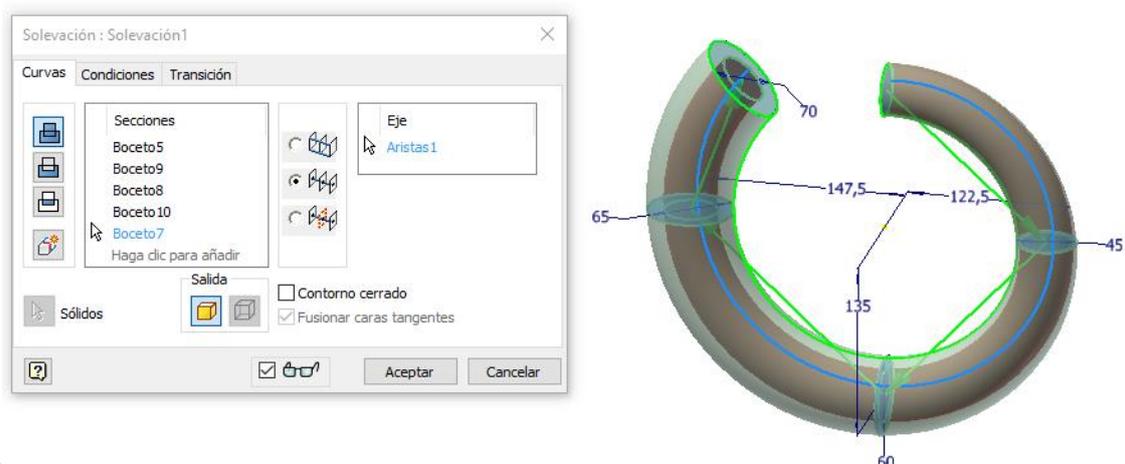


Figura 6-4. Generación de una solevación

Posteriormente, para completar el recorrido del fluido es necesario hacer una curvatura en la parte superior de la espiral, la cual, se alcanzará mediante la creación de un spline de interpolación.

Además, se practicará una extrusión en la parte central de la espiral, para completar la parte interna de la carcasa como se ve en la siguiente figura.

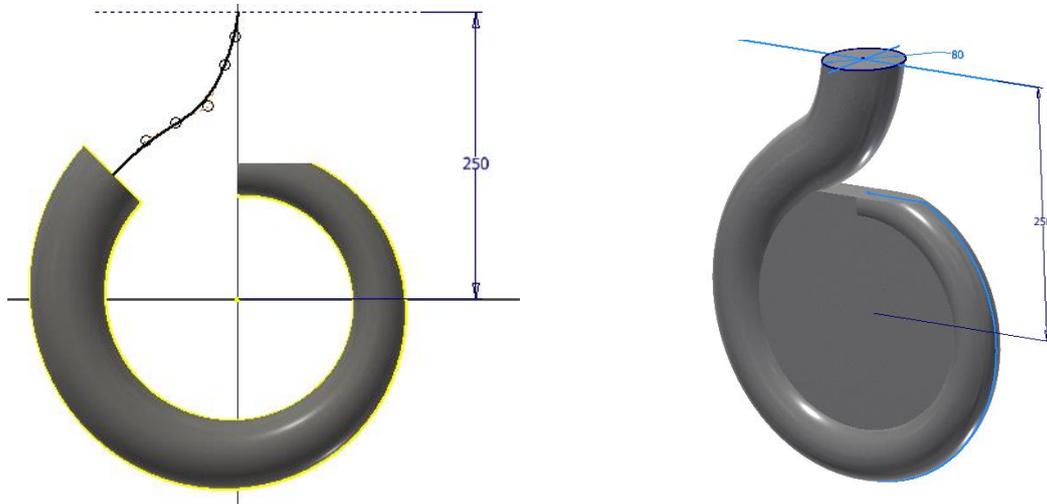


Figure 6-5. Creación del spline de interpolación

Ahora es necesario llevar a cabo el mismo proceso que el completado hasta el momento con la diferencia de aumentar en 10 mm el tamaño de los bocetos, para conseguir así el espesor deseado en el caracol. Dicha repetición del procedimiento descrito anteriormente se debe finalizar con la creación de un nuevo sólido. Esto se consigue seleccionando la opción “generar nuevo sólido” en lugar de “unión” como es habitual.

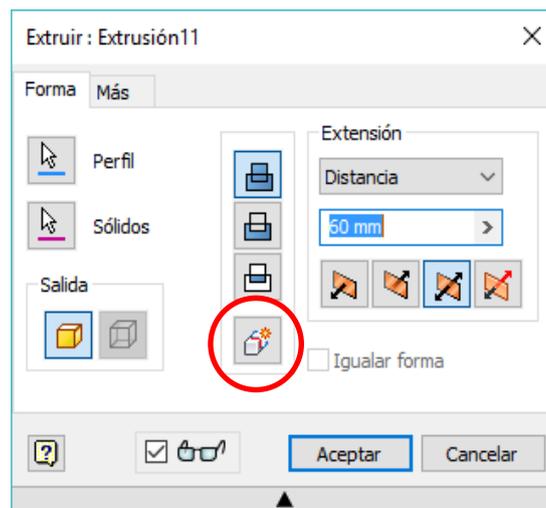


Figura 6-6. Generación de nuevo sólido

Una vez generada la nueva forma, se restarán los dos volúmenes para componer la voluta exterior con un espesor de pared de 10 mm. El resultado se evidencia en la *Figura 6.7*:

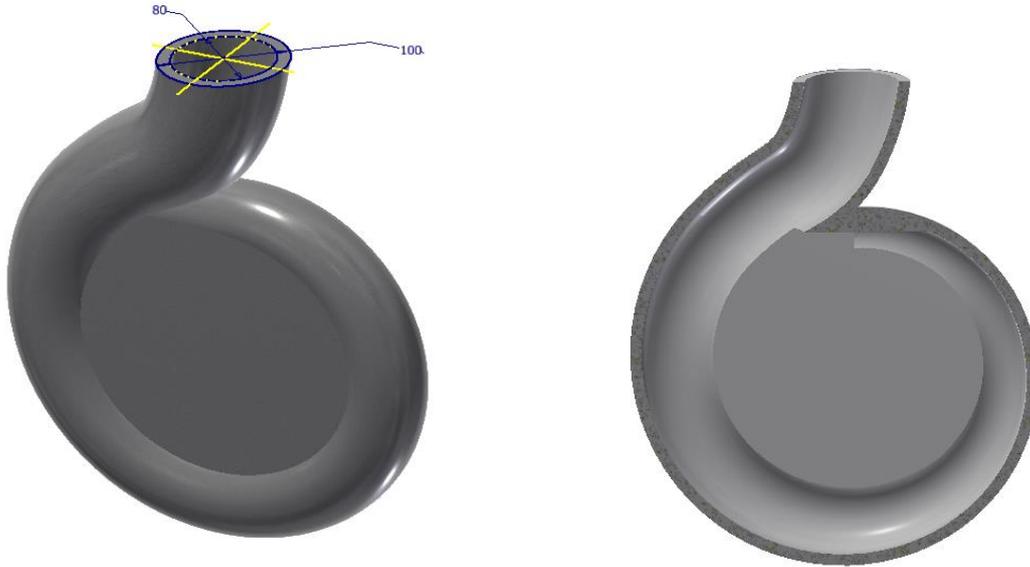


Figura 6-7. Voluta de la bomba centrífuga

El siguiente paso a llevar a cabo, es la modelización de la entrada principal de fluido. Para ello, se ha procedido a la creación de un tocho macizo con la forma de brida deseada mediante una revolución, seguido de un vaciado de revolución con el que se consigue la cavidad interior. Si bien podría realizarse con una única revolución dibujando el perfil con el vaciado incluido, se ha optado por dos para simplificar los bocetos y así facilitar el cambio de dimensiones en futuras modificaciones de diseño.

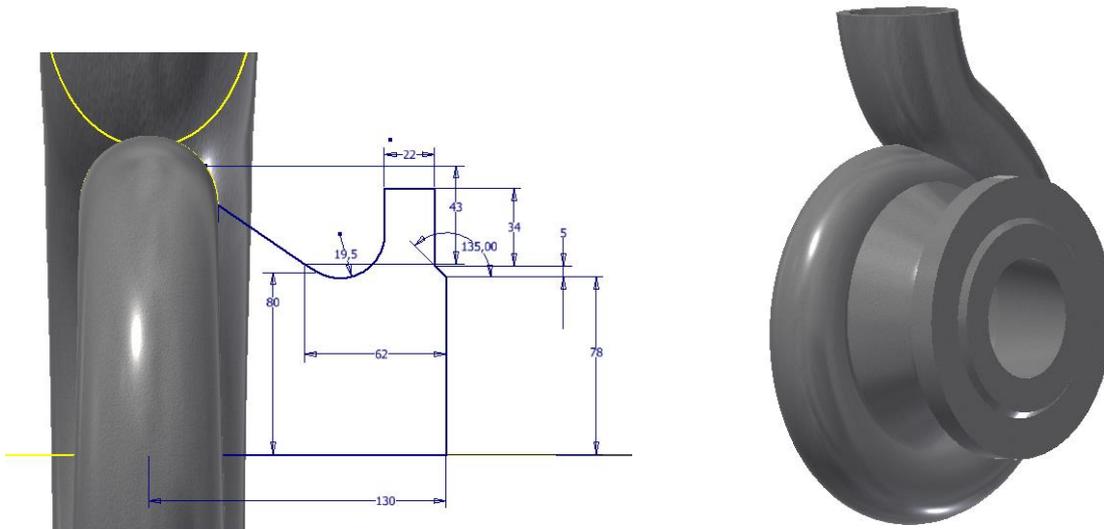


Figura 6-8. Generación de parte del embridado de entrada

Siguiendo el mismo procedimiento que con la parte bridada de la entrada del fluido, se realizará una revolución y posterior vaciado en el lado contrario, parte que irá conectada con la caja de rodamientos. Una vez hecha esta operación, se procede a la extrusión que acogerá los espárragos para la unión de las partes externas de la bomba.

En el momento que se ha creado dicha extrusión es necesario practicar los agujeros a la superficie. Esto se conseguirá mediante la operación de inventor "Agujero", en la cual, es necesario indicar la posición del enroscado mediante un boceto, en el que se crea un punto, y definir las características necesarias a la operación mediante su panel de configuración (tipo de roscado, diámetro, profundidad, etc.). Una vez creado el primer agujero, para la optimización de tiempo en el modelado, se utiliza la herramienta "simetría". Con ella es posible conseguir una simetría polar con la que hacer fácilmente todos los agujeros, seleccionando el número necesario, así como los grados en los que repartirlos.

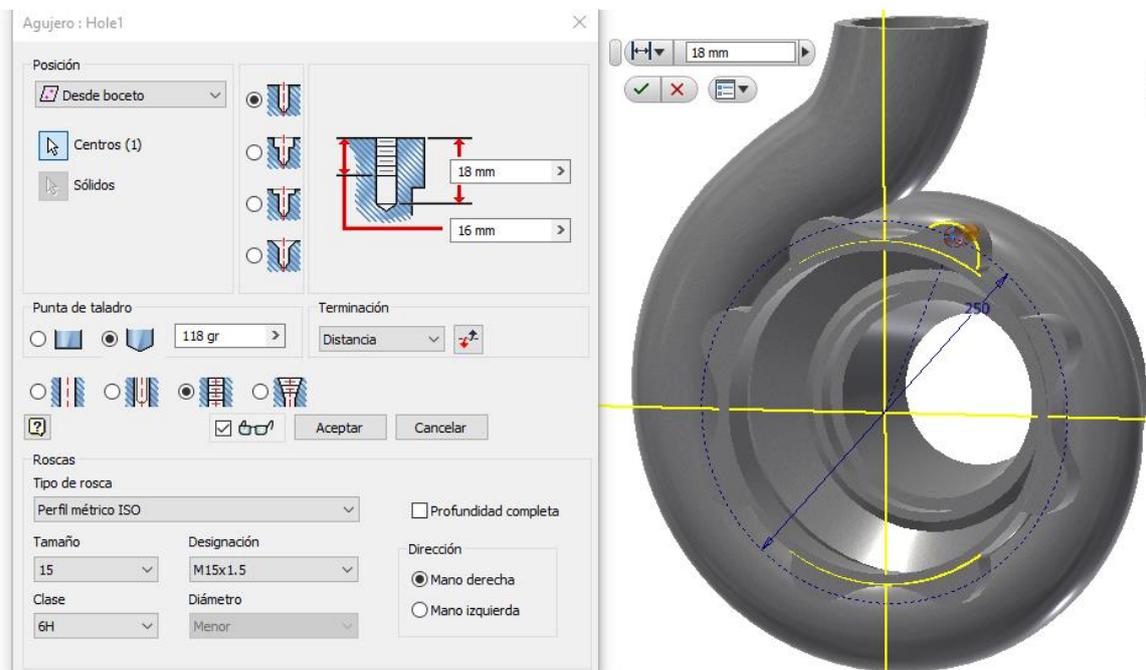


Figura 6-9. Creación de agujero en el embrizado de salida

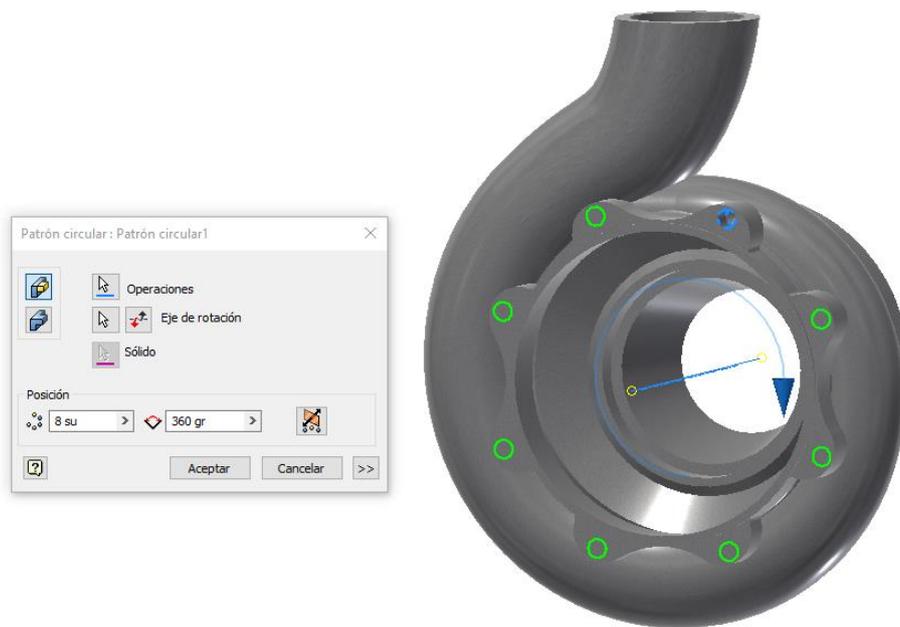


Figura 6-10. Simetría polar para la creación de un patrón circular

Para finalizar el modelado de la carcasa, tan solo faltaría realizar el embridado de salida y los soportes que se atornillan al suelo para la sujeción de la bomba. Ambas características se obtienen jugando con extrusiones de adición y supresión de material, así como con la técnica de creación de agujeros y simetrías. En la siguiente figura, se puede ver el componente finalizado por completo:



Figura 6-11. Modelo acabado de la carcasa

6.2.2 Caja de rodamientos

La carcasa trasera o caja de rodamientos es la encargada de alojar en su interior el eje y los rodamientos, fijando así la barra longitudinalmente de forma que no flecte.

Para su modelado, se sigue la misma metodología comentada anteriormente. En primer lugar, se revolucionará el tocho macizo y posteriormente se realizarán los vaciados necesarios con el fin de simplificar los bocetos.

Por tanto, el primer paso será crear un esquema con el dibujo del perfil exterior de la carcasa trasera restringiendo debidamente todas las líneas implicadas en el boceto y posteriormente se revolucionará.

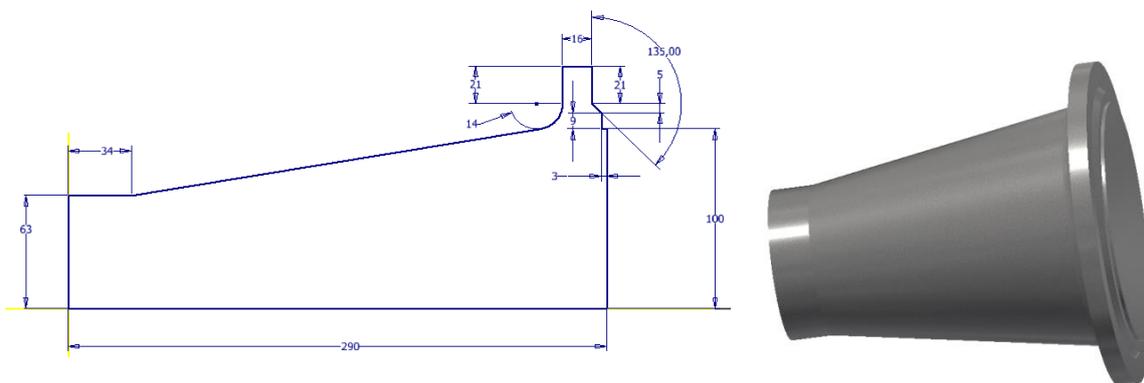


Figura 6-12. Revolución del tocho macizo en la carcasa trasero

A continuación, se practican los dos vaciados correspondientes, así como una extrusión de eliminación de material que unirá ambos vaciados por el pilar intermedio. Son en estas cavidades donde irán instalados los rodamientos.

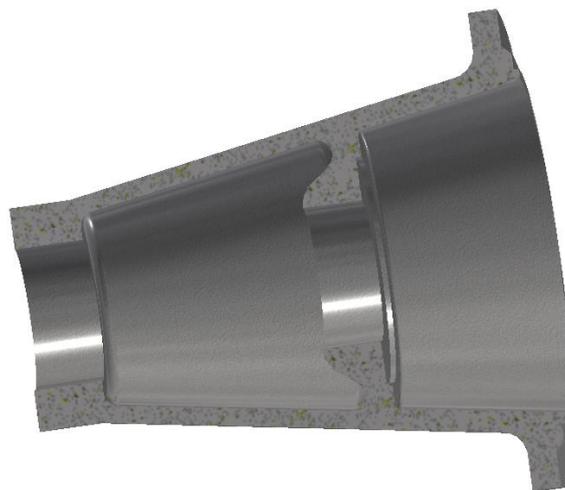


Figura 6-13. Vaciado de la caja de rodamientos

Para finalizar el modelado de la pieza, se han añadido los elementos que complementan el componente, como son la entrada de aceite, la protusión donde va unido el pie de la bomba mediante un tornillo, un nervio que garantiza la fiabilidad de la pieza ante posibles vibraciones, así como los agujeros de unión a la carcasa principal y redondeos necesarios.

Para la entrada de aceite, en primer lugar se ha generado una extrusión de una circunferencia de 24 mm de diámetro, que atraviese la pared de la carcasa. Posteriormente, mediante la creación de un punto en el boceto, con centro en dicha circunferencia, se ha hecho el agujero pasante eligiendo la opción “*agujero*” comentada anteriormente.

Para la protusión solamente ha sido necesaria una extrusión con el perfil deseado. De nuevo se ha practicado un agujero pasante donde irá unido el pie de la bomba. Este agujero ha sido creado de la misma forma que los anteriormente citados.

En cuanto al nervio, inventor dispone de una operación para este tipo de elementos. Con la operación *nervio* es necesario crear un perfil con un boceto, la operación fabricará el nervio en el interior de este perfil. Es necesario indicar el sentido de la extrusión que realiza, así como la dirección paralela al plano del boceto, todo ello para que la operación se genere correctamente.

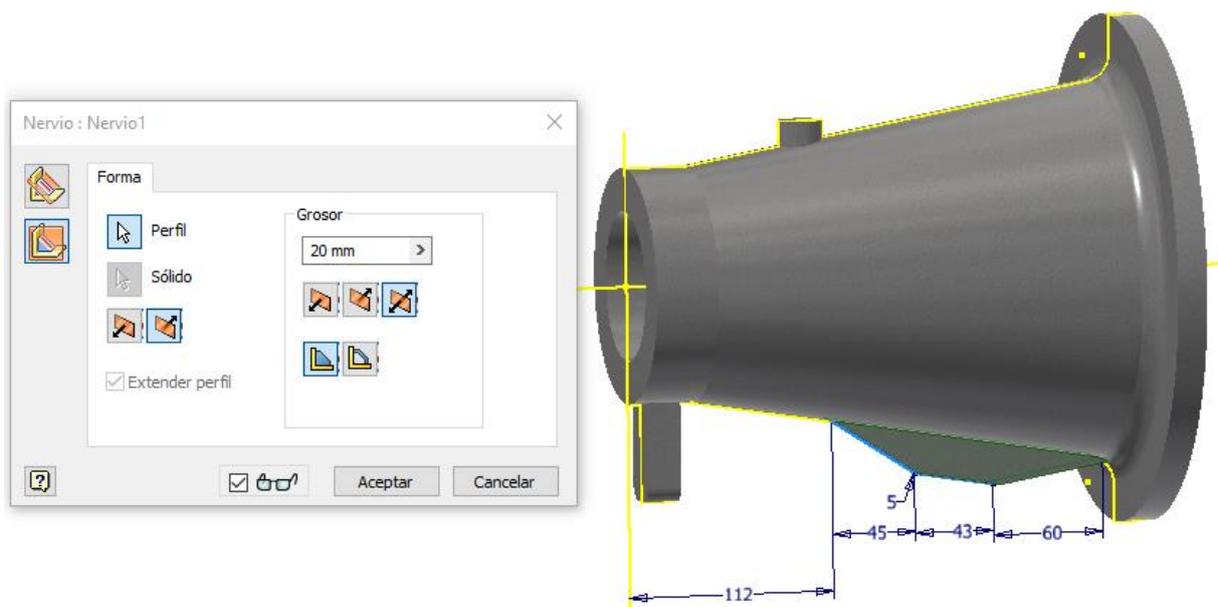


Figura 6-14. Generación del nervio inferior

Por último, se completa la pieza con un chaflán en la parte trasera de la pieza, finalizando su modelado:



Figura 6-15. Modelo acabado de la caja de rodamientos

6.2.3 Rodete

Para el modelado del rodete, en primer lugar, se utilizarán sendas revoluciones, una primera para crear un tocho macizo y otra para sustracción de material interno. Con ello, se generan las paredes del impulsor, como se observa en la imagen *a*. (ver figura 6.16). El siguiente paso, será crear el perfil de un álabe en la pared plana del rodete, que posteriormente se extruirá hasta la pared curva (ver imagen *b*. figura 6.16). Una vez generado el primer álabe, se realizará un patrón circular para conseguir el total de seis.

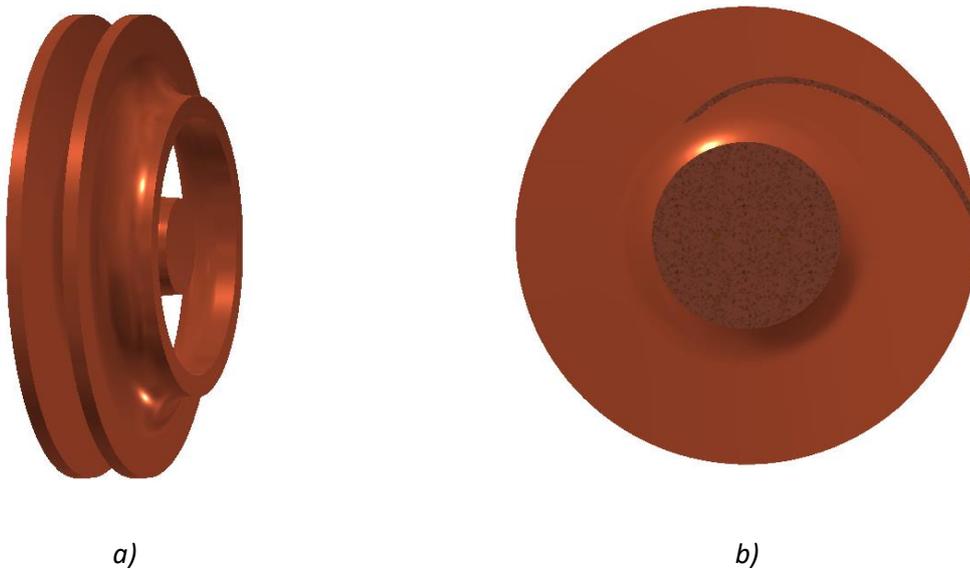


Figura 6-16. Pasos en el modelado del rodete

Para finalizar el modelo, se practicará un agujero que aloja al eje y el chavetero, uniendo los tres elementos. Además, se añadirán unos nervios que hacen más robusto el diseño, así como los chaflanes correspondientes. La Figura muestra el componente final:



Figura 6-17. Modelo final del rodete

6.2.4 Eje

El proceso de modelización de esta parte es diferente a las anteriores, esto es debido a que no se utilizará el método tradicional de extrusiones y revoluciones, sino que se tratará con una herramienta de Inventor llamada “Design accelerator”. Esta, permite realizar el modelado de ejes y engranajes de una forma sencilla, rápida e intuitiva basada en la norma.

En esta herramienta, Inventor abre una tabla en la que se pueden modificar los diferentes parámetros de cada parte del eje: operaciones de primera arista (chaflán, empalme, tuerca de seguridad...); tipo de sección (cilíndrica, cónica o poligonal); operaciones de segunda arista (chaflán, empalme, tuerca de seguridad...); operaciones de secciones (acanalado, ranura para chaveta, llave...). Con ello se puede completar una a una todas las secciones del eje hasta su entera definición. En la siguiente figura, se muestran las opciones elegidas para el modelado del eje.

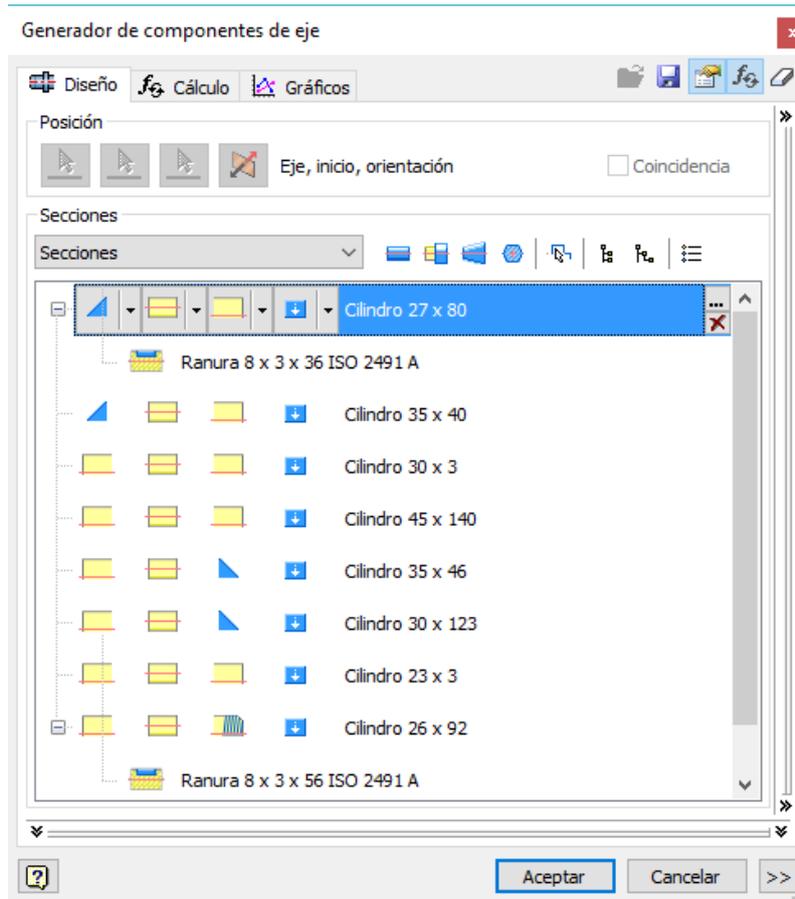


Figura 6-18. Diferentes secciones del eje

El eje modelado quedaría de la siguiente manera:



Figura 6-19. Modelo final del eje

6.2.5 Tapa de rodamientos

La tapa de rodamientos es una pieza que va fijada a la carcasa trasera mediante tres tornillos. Su función es proteger los rodamientos instalados en la carcasa trasera. Como rodamientos, hay dos, uno situado en la parte posterior de la carcasa y otro situado en el interior de la misma.

Para su modelado, primero se ha revolucionado el perfil para crear el tocho inicial, seguidamente se ha practicado el agujero interior por donde pasa el eje y finalmente se realizan los agujeros que lo fijarán a la carcasa mediante la técnica comentada en componentes anteriores.



Figura 6-20. Tapa de rodamientos

6.2.6 Brida intermedia

La brida intermedia es la parte que se dispone entre la voluta y la carcasa trasera. Ella acoge al cierre hidráulico compuesto por el anillo linterna, la estopa y el prensaestopas. La brida tiene dos agujeros frontales en los que va fijado el prensaestopas y con los que se puede manejar el apriete del mismo. También dispone de un agujero superior canalizado y alineado con el anillo linterna.

Para modelar, lo primero es realizar la revolución completa del perfil. Para ello se crea el dibujo en el boceto y posteriormente se revoluciona a través del eje “y”.

Una vez se tiene el grueso de la pieza modelado, se actuará de la forma habitual en piezas de revolución, es decir, se procede con vaciado mediante la revolución de perfiles y extrusiones sustrayendo material. Para finalizar la pieza se incluye un cilindro interior, el cual acogerá un agujero para la refrigeración del eje. Este agujero debe coincidir con el del anillo linterna. Con ello se habrá acabado una pieza de gran importancia para el buen funcionamiento de la bomba.



Figura 6-21. Modelo finalizado de la brida intermedia

6.2.7 Piezas que completan el modelo

Por simplicidad en la geometría, a continuación se detallan las piezas que han sido creadas para el prototipo virtual, pero que no se explicará el método de generación.

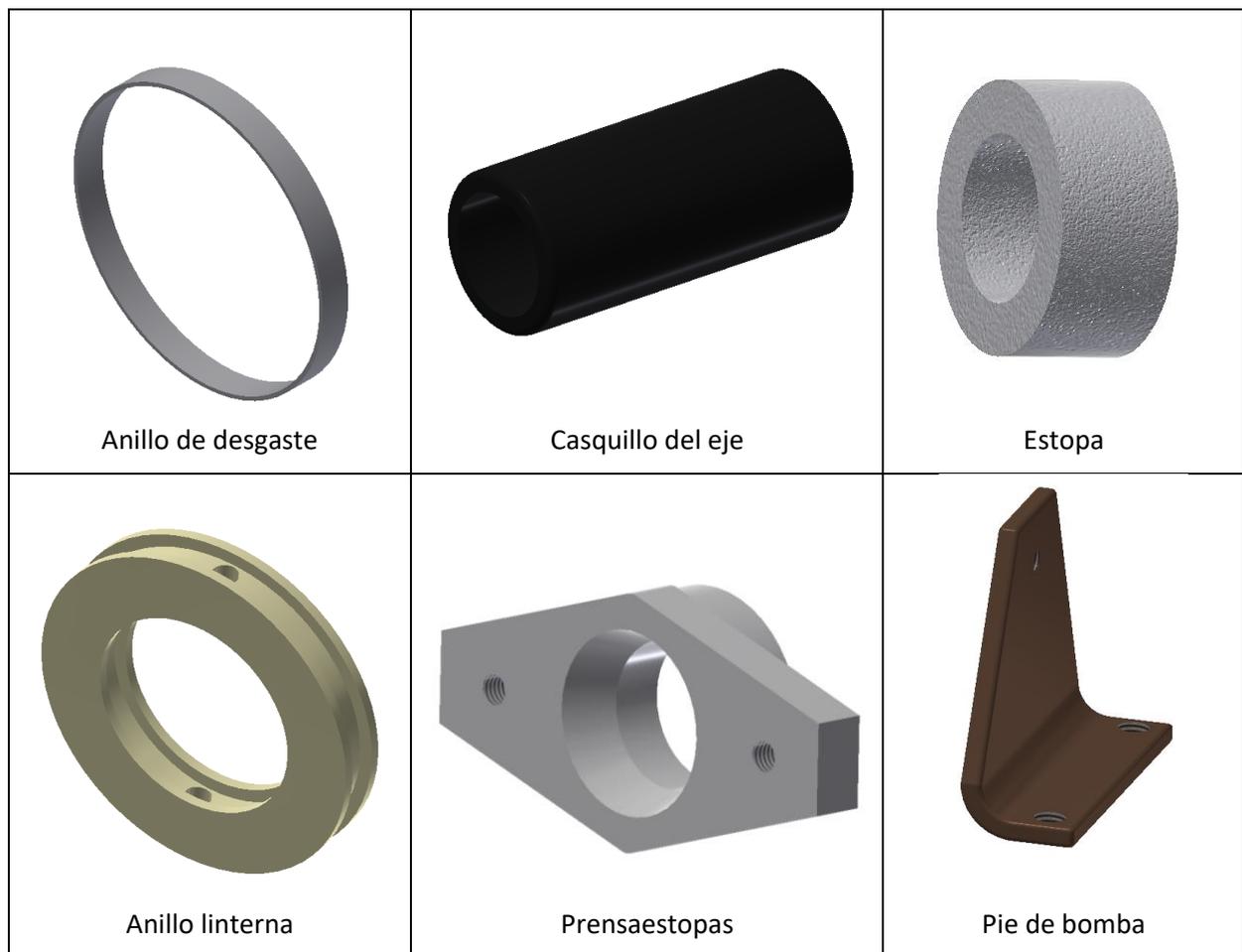


Figura 6-22. Componentes adicionales

Además de los elementos modelados, la bomba dispone de elementos normalizados como espárragos, tornillos, tuercas o rodamientos. Todos estos componentes no se han diseñado, sino que se ha utilizado el “Centro de Contenido” de Inventor, el cual contiene una base de datos con más de 750.000 partes y 18 normas. A continuación, se resume en una tabla los elementos utilizados, correspondientes al catálogo de la bomba DB de Kirloskar.

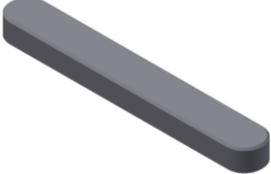
 <p>Rodamiento</p>	 <p>Tornillo</p>	 <p>Chaveta</p>
 <p>Tuerca</p>	 <p>Esparrago</p>	

Figura 6-23. Elementos normalizados

7. PARAMETRIZACIÓN

La parametrización se basa principalmente en la especificación de elementos geométricos como los puntos, líneas, curvas y superficies a través de diferentes parámetros que se mueven un rango definido por el usuario. Este es capaz de controlar los cambios realizados en el diseño sin la necesidad de sustituir entidades geométricas.

El propósito del siguiente apartado es crear un modelo paramétrico de la parte más compleja de la máquina ideada, la voluta. Dicha idea surge de la observación de una gran variedad de modelos comerciales existentes para una misma bomba, en función de las especificaciones necesarias que requiere la instalación. Es decir, dependiendo de la altura y el caudal necesario, la geometría de la bomba varía, aumentando o disminuyendo su tamaño. Si se pretende analizar el funcionamiento de todos los modelos existentes, es una tarea laboriosa tener que crear uno a uno todos. Por todo ello, se pretende modelar una pieza parametrizada en la que modificando unas dimensiones genéricas, la geometría se adapte automáticamente.

Para obtener el modelo paramétrico, se establecerá una metodología de trabajo, con la que se intentará conseguir que el diseño propuesto sea robusto y flexible. Así, se busca incrementar la calidad del modelo CAD y disminuir el tiempo de creación de piezas con diferentes valores de geometría.

El modelado paramétrico solo funciona eficientemente si está bien organizado y estructurado. Por lo tanto, para realizar un buen diseño, es necesario seguir un *workflow* en el que se incluye una preparación inicial, una fase de modelado y por último una etapa de evaluación del modelo y cómo este se comporta en casos de dimensiones extremas.

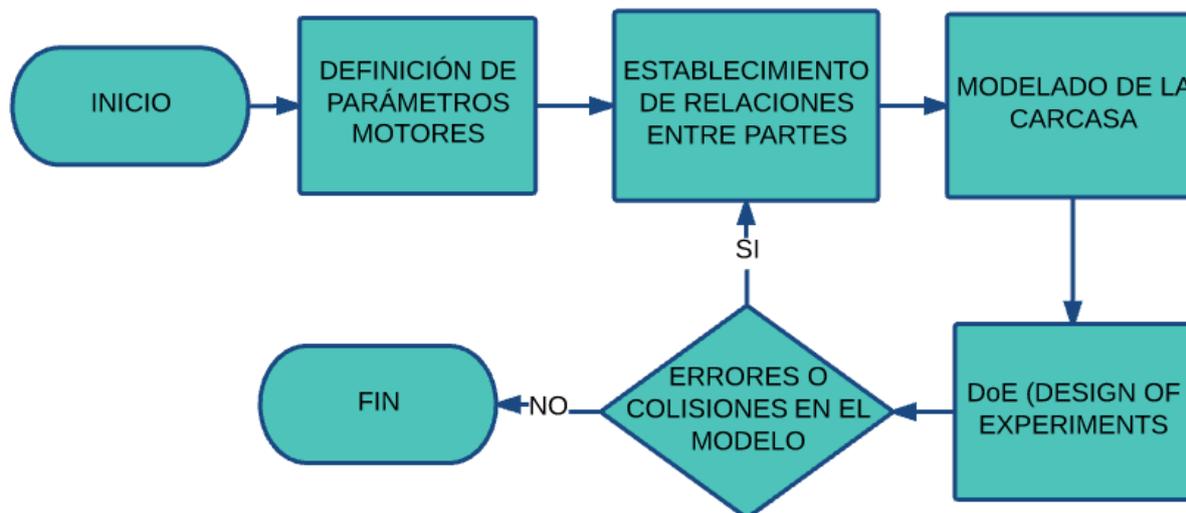


Figura 7-1. Diagrama de flujo en parametrización de modelos

En primer lugar se identifican las variables del modelo, en las cuales se basarán todas las dimensiones. Dichas variables, en este caso, vienen impuestas por el fabricante Kirloskar. Como se puede ver en la *Figura 7.2*, la voluta tiene once parámetros principales que varían en función del tipo de bomba que ofrece. Además, existen parámetros que interrelacionan dimensiones en el ensamblaje de la bomba. Para el caso de estudio, estos parámetros no se tendrán en cuenta puesto que solo se pretende modelar la voluta mediante este método, pero cabe destacar que en una parametrización completa del modelo, también sería posible relacionar dimensiones en el ensamblaje entre piezas.

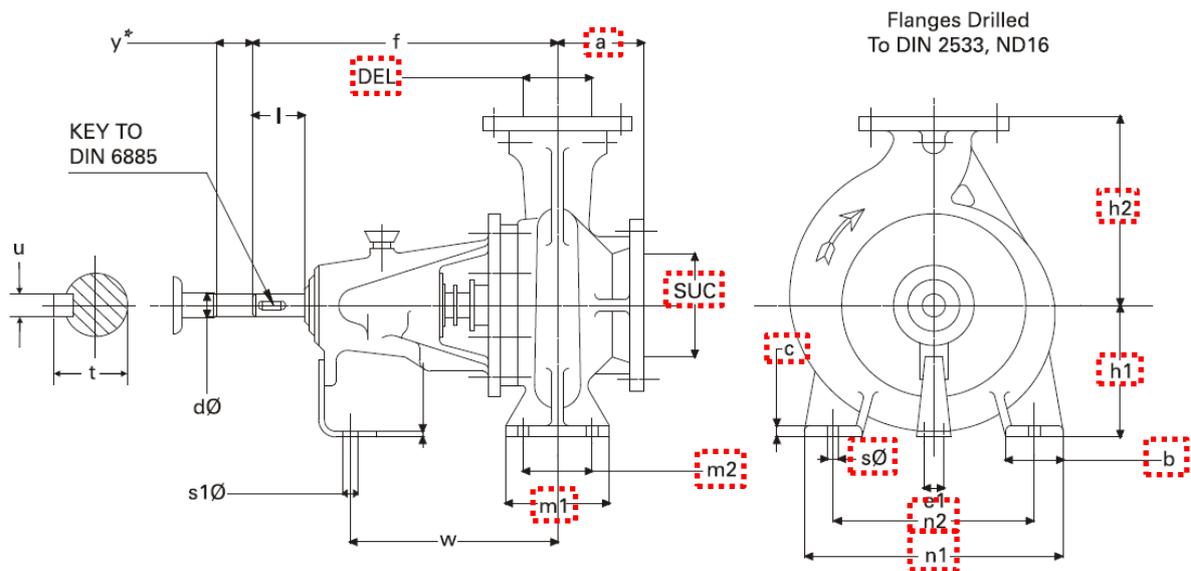


Figura 7-2. Esquema de la bomba con los parámetros motores

Por tanto, los parámetros a tener en cuenta para la carcasa serán: “DEL,” a”, “SUC”, “m1”, “m2”, “h1”, “h2”, “b”, “n1”, “n2”, “s0” y “c”. Además, es importante tener claro cuáles van a ser las variaciones del modelo y en qué rango se van a mover los parámetros. En la *Figura 7.3* es posible observar los diferentes modelos de bomba ofrecidos en función del punto de funcionamiento necesario.

PUMP MODEL	UNIT NO.	SUC.	DEL.	PUMP MOUNTING DIMENSIONS														SHAFT END					WT. KG
				a	f	h1	h2	b	c	m1	m2	n1	n2	sØ	e1	slØ	w	dØ	l	t	u	y	
32/13	25	50	32	80	360	112	140	50	14	100	70	190	140	14	100	14	267	24	50	27	8	100	28
32/16	25	50	32	80	360	132	160	50	14	100	70	240	190	14	100	14	267	24	50	27	8	100	34
32/20	25	50	32	80	360	160	180	50	14	100	70	240	190	14	110	14	267	24	50	27	8	100	41
32/26	25	50	32	100	360	180	225	65	14	125	95	320	250	14	110	14	267	24	50	27	8	100	59
40/13	25	65	40	80	360	112	140	50	14	100	70	210	180	14	100	14	267	24	50	27	8	100	29
40/16	25	65	40	80	360	132	160	50	14	100	70	240	190	14	100	14	267	24	50	27	8	100	36
40/20	25	65	40	100	360	160	180	50	14	100	70	265	212	14	110	14	267	24	50	27	8	100	44
40/26	25	65	40	100	360	180	225	65	14	125	95	320	250	14	110	14	267	24	50	27	8	100	61
50/13	25	65	50	100	360	132	160	50	14	100	70	240	190	14	100	14	267	24	50	27	8	100	32
50/16	25	65	50	100	360	160	180	50	14	100	70	265	212	14	110	14	267	24	50	27	8	100	38
50/20	25	65	50	100	360	160	200	50	14	100	70	265	212	14	110	14	267	24	50	27	8	100	46
50/26	25	65	50	100	360	180	225	65	14	125	95	320	250	14	110	14	267	24	50	27	8	100	63
50/32K	35	65	50	125	470	225	290	80	16	160	120	400	315	18	110	14	342	32	80	35	10	140	83
65/13	25	80	65	100	360	160	180	65	14	125	95	280	212	14	110	14	267	24	50	27	8	100	39
65/16	25	80	65	100	360	160	200	65	14	125	95	280	212	14	110	14	267	24	50	27	8	100	43
65/20	25	80	65	100	360	180	225	65	14	125	95	320	250	14	110	14	267	24	50	27	8	100	52
65/26	35	80	65	100	470	200	250	80	16	160	120	360	280	18	110	14	342	32	80	35	10	140	81
65/32	35	80	65	125	470	225	280	80	16	160	120	400	315	18	110	14	342	32	80	35	10	140	100
80/16	25	100	80	125	360	180	225	65	14	125	95	320	250	14	110	14	267	24	50	27	8	100	53
80/20	35	100	80	125	470	180	250	65	14	125	95	345	280	14	110	14	342	32	80	35	10	140	70
80/26	35	100	80	125	470	200	280	80	16	160	120	400	315	18	110	14	342	32	80	35	10	140	91
80/32	35	100	80	125	470	250	315	80	16	160	120	400	315	18	110	14	342	32	80	35	10	140	107
100/20	35	125	100	125	470	200	280	80	16	160	120	360	280	18	110	14	342	32	80	35	10	140	85
100/26	35	125	100	140	470	225	280	80	16	160	120	400	315	18	110	14	342	32	80	35	10	140	103
100/32	35	125	100	140	470	250	315	80	16	160	120	400	315	18	110	14	342	32	80	35	10	140	116
100/40	45	125	10	140	530	280	355	100	18	200	150	500	400	23	110	14	370	42	110	45	12	140	177
125/26	35	150	125	140	470	250	355	80	16	160	120	400	315	18	110	14	342	32	80	35	10	140	110
125/32	45	150	125	140	530	280	355	100	18	200	150	500	400	23	110	14	370	42	110	45	12	140	151
125/40	45	150	125	140	530	315	400	100	18	200	150	500	400	23	110	14	370	42	110	45	12	140	188

Figura 7-3. Tabla dimensional de los diferentes modelos

A modo de resumen se ha creado la siguiente tabla con los valores máximos y mínimos en los que se moverá la voluta.

TABLA DE DEFINICIÓN DE PARÁMETROS					
Nombre	Descripción	Min.	Ref.	Max.	Ud.
DEL	Diámetro de descarga de la bomba centrífuga	32	80	150	mm
a	Distancia entre el plano de succión y descarga	80	125	160	mm
SUC	Diámetro de succión de la bomba centrífuga	50	100	200	mm
m1	Profundidad de los pies de la carcasa	100	125	200	mm
m2	Distancia entre agujeros para pernos de fijado	70	95	150	mm
h1	Altura inferior	112	180	315	mm
h2	Altura superior	140	250	450	mm
b	Anchura de los pies de la carcasa	50	65	100	mm
n1	Distancia mayor en anchura entre los dos pies	190	345	550	mm
n2	Distancia entre agujeros de los dos pies	140	280	450	mm
SØ	Diámetro del agujero de fijado	14	14	14	mm

Figura 7-4. Tabla de parámetros con dimensiones límite

Cuando se han definido todos los parámetros que van a ser los motores del diseño, así como los rangos en los que se moverá la bomba, es hora de comenzar a trabajar con Inventor. En primer lugar se tienen que crear yendo a la pestaña *Administrar > Parámetros*. Dentro de esta ventana se pueden crear diferentes tipos, numéricos, de verdadero y falso o de texto. Para este caso se utilizarán únicamente valores numéricos como se ha visto. Se procede entonces a crear todos los parámetros indicando como valor nominal el valor de referencia del modelo elegido (80/20). Para todos ellos se utilizará el milímetro como unidad de medida.

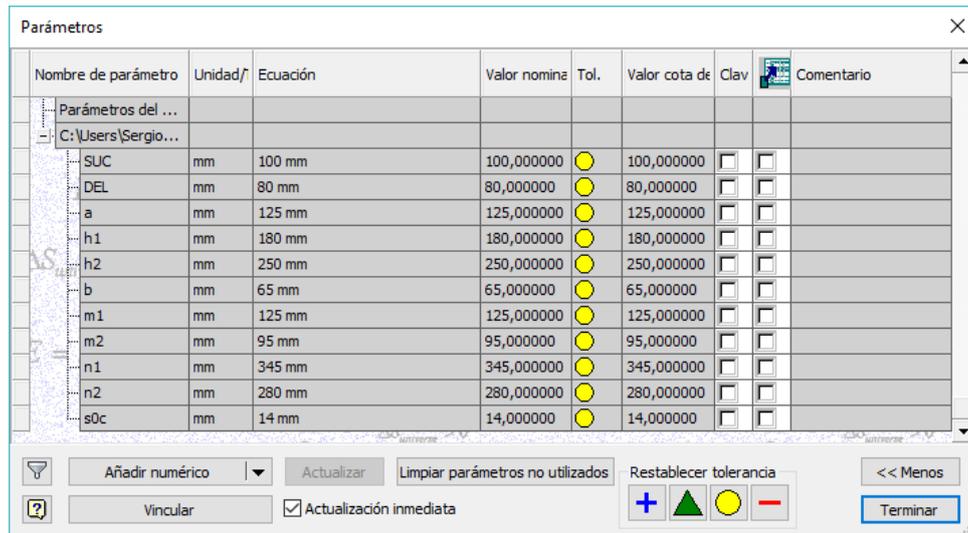


Figura 7-5. Generación de parámetros en Inventor

Una vez se han creado las variables a las que se referenciarán todas las dimensiones del modelo, es posible comenzar con el diseño de la voluta. Para ello, es importante comprender la intención de diseño, así como la funcionalidad. Para hacer más sencilla la tarea de modelado, en primer lugar se va a descomponer la geometría en pequeños subgrupos de acuerdo a diferentes propiedades como simetrías, patrones o elementos.

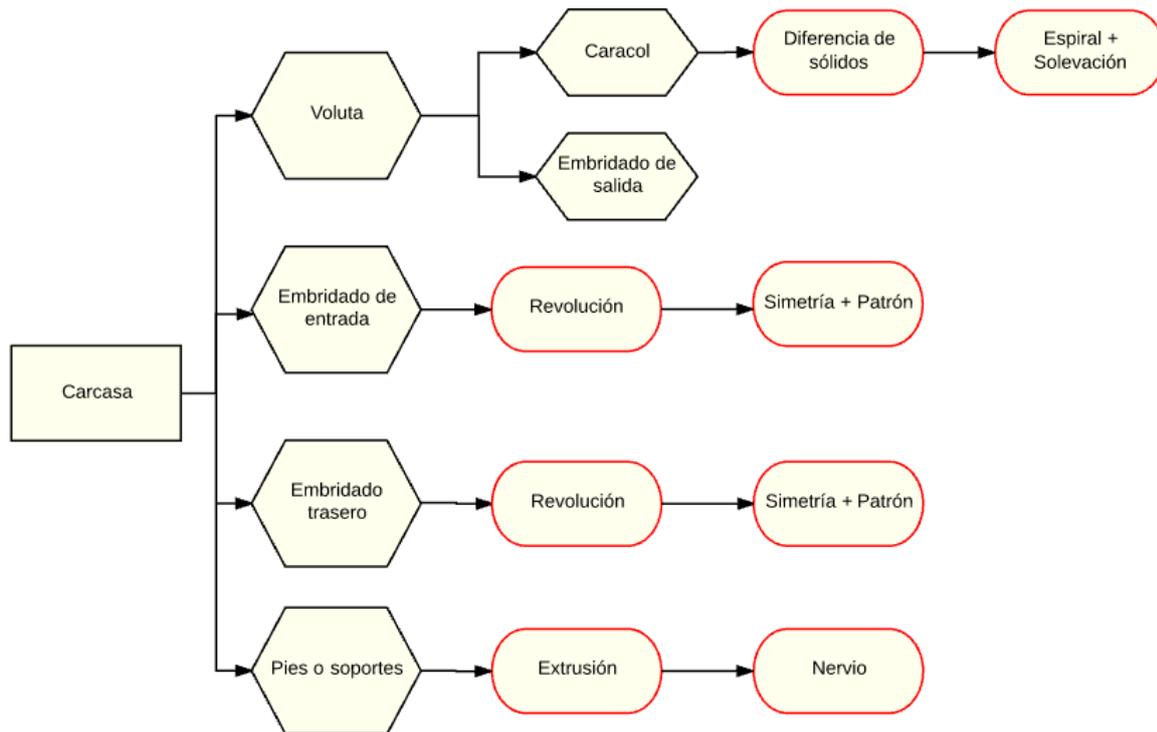


Figura 7-6. Descomposición de características y operaciones de modelado en la carcasa

Llegados a este punto, es el momento de modelar desde cero la carcasa parametrizada estableciendo las relaciones entre partes del componente. Se comenzará con la espiral como se comentó en el apartado de modelización y se proseguirá de la misma manera. Pero a diferencia del modelado normal, en este capítulo se debe asignar a cada cota creada automáticamente por Inventor en el boceto, una ecuación que la relacione con una de las variables de usuario. Las ecuaciones deben crearse de forma que el modelo quede estéticamente correcto, ya que no se tiene más información de cómo interactúan las diferentes mediciones de la bomba. En la siguiente figura es posible ver cómo en los bocetos creados para construir la solevación interior, están expresados en función de otros parámetros de la forma **fx: "valor"**.

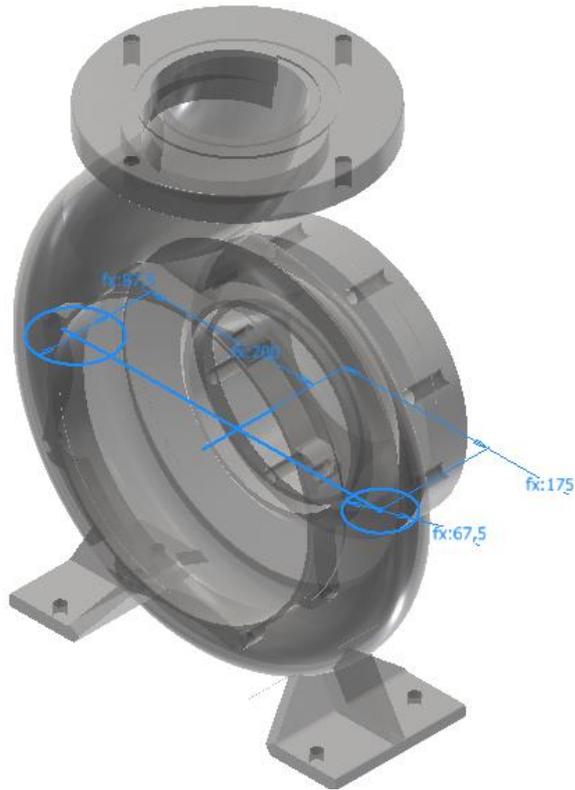


Figura 7-7. Expresión de cotas parametrizadas

Nombre de parámetro	Unidad	Ecuación	Valor nomir	Tol.	Valor cota	Clav	Comentario
d2	mm	50 mm	50,000000	●	50,000000	<input type="checkbox"/>	
d4	su	7 su / 8 su	0,875000	●	0,875000	<input type="checkbox"/>	
d14	mm	(DEL / 2 su) + 5 mm	45,000000	●	45,000000	<input type="checkbox"/>	
d15	mm	(h2 / 2 su) - 2,5 mm	122,500...	●	122,500...	<input type="checkbox"/>	
d16	mm	(DEL / 2 su) + 20 mm	60,000000	●	60,000000	<input type="checkbox"/>	
d17	mm	(h2 / 2 su) + 10 mm	135,000...	●	135,000...	<input type="checkbox"/>	
d18	mm	(DEL / 2 su) + 25 mm	65,000000	●	65,000000	<input type="checkbox"/>	
d19	mm	(h2 / 2 su) + 22,5 mm	147,500...	●	147,500...	<input type="checkbox"/>	
d20	mm	(DEL / 2 su) + 30 mm	70,000000	●	70,000000	<input checked="" type="checkbox"/>	
d21	su	0 su	0,000000	●	0,000000	<input type="checkbox"/>	
d22	gr	90 gr	90,000000	●	90,000000	<input type="checkbox"/>	
d23	su	0 su	0,000000	●	0,000000	<input type="checkbox"/>	
d24	gr	90 gr	90,000000	●	90,000000	<input type="checkbox"/>	

Actualización inmediata

Figura 7-8. Relación de cotas con parámetros

Queda claro que cada valor que pueda variar en el modelo tiene que tener una ecuación asociada, dependiente de los parámetros motrices asignados. Bien es cierto que existen además valores que serán constantes en todo momento, como algunos ángulos rectos u otras características pertenecientes a restricciones.

Una vez se ha modelado la carcasa por completo, se va a crear una tabla de diseño con estas variables y se vinculará posteriormente a Inventor, para poder actualizar de forma rápida los parámetros según las necesidades. Dicha tabla de diseño, consiste básicamente en un formato Excel que resume los parámetros, su valor y unidades. Inventor los tomará pues de este archivo y se actualizará el diseño de forma automática. Para asociar el archivo Excel a Inventor simplemente se debe seleccionar la opción "Vincular" dentro del menú de "Parámetros" y elegir el archivo .xls correspondiente.

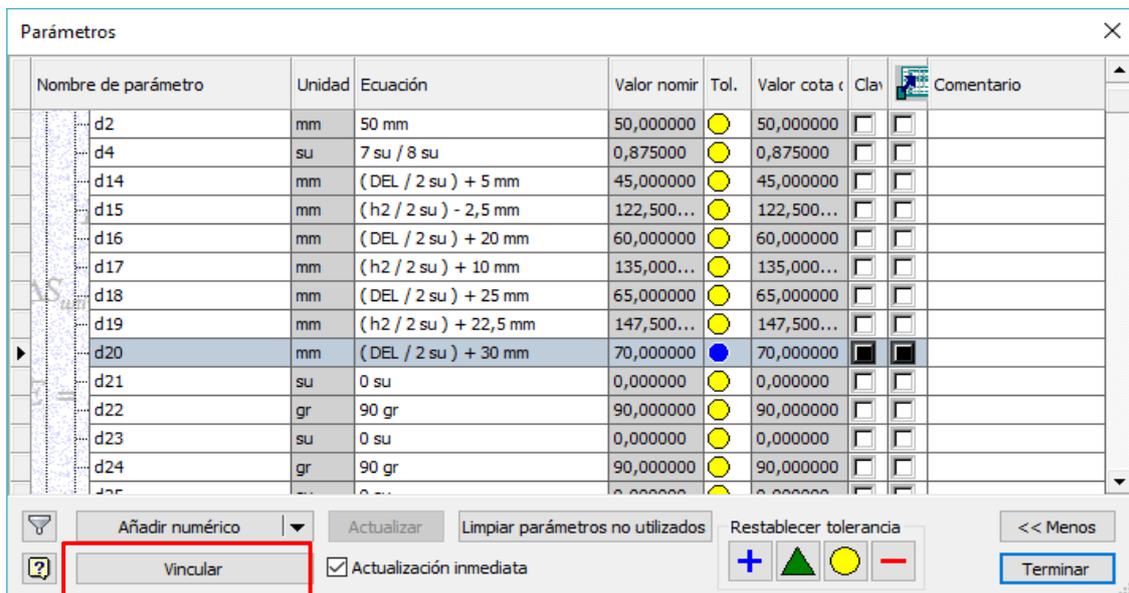


Figura 7-9. Vinculación de la tabla de diseño y Actualización del modelo

Por último, se debe de evaluar la calidad del modelo generado mediante un DoE (*Design of Experiments*) en el cual se ensaya todo el abanico de posibilidades, comprobando que el modelo final no tiene errores. Mediante la tabla de diseño creada en Excel, se comprobará que todas las variantes de bombas encajan con el diseño sin producir errores o colisiones en la geometría. A continuación se muestran algunos ejemplos de diferentes modelos de la bomba, observando que el proceso de modelización paramétrica se ha concluido con éxito.



a) 65/20



b) 80/20



c) 100/20



d) 125/26

Figura 7-10. Generación de diferentes modelos de la bomba Kirloskar DB

8. ENSAMBLAJE COMPLETO DEL MODELO

Para realizar el ensamblaje de la bomba centrífuga completa, se procederá de manera similar a como se haría el montaje de forma real, en este caso se va a utilizar restricciones para bloquear los grados de libertad necesarios.

Las restricciones utilizadas en la simulación, cobrarán relevante importancia, ya que a partir de ellas el modelo se comportará de una forma u otra. Esto afectará al funcionamiento de la simulación. Para crear un nuevo montaje, se debe seleccionar la opción de *Nuevo > Ensamblaje*. Con ello se crea un nuevo archivo con la extensión “.iam”, que es la utilizada por Inventor para los ensamblajes.

En primer lugar, se toma como pieza fija la carcasa trasera, que servirá de referente para montar los demás componentes. Esta se debe fijar en el eje de coordenadas para una mayor facilidad en el montaje. Se ha optado por fijar esta pieza ya que no tiene ningún grado de libertad, además, es una de las piezas que primero se utilizan en el montaje.

Una vez fijada la carcasa trasera, se insertará la primera tapa de los rodamientos y se posicionará en la parte posterior. Para fijar dicha pieza se utilizan dos restricciones. En primer lugar se usa la restricción insertar, la cual alinea los ejes de rotación de las piezas (vista en la *Figura 8.1* en rojo) y hace coincidentes una de sus aristas (marcada en la Figura en verde). Con ello se consigue que la pieza quede situada en la posición correcta, pero con libertad de giro en el eje “y”.

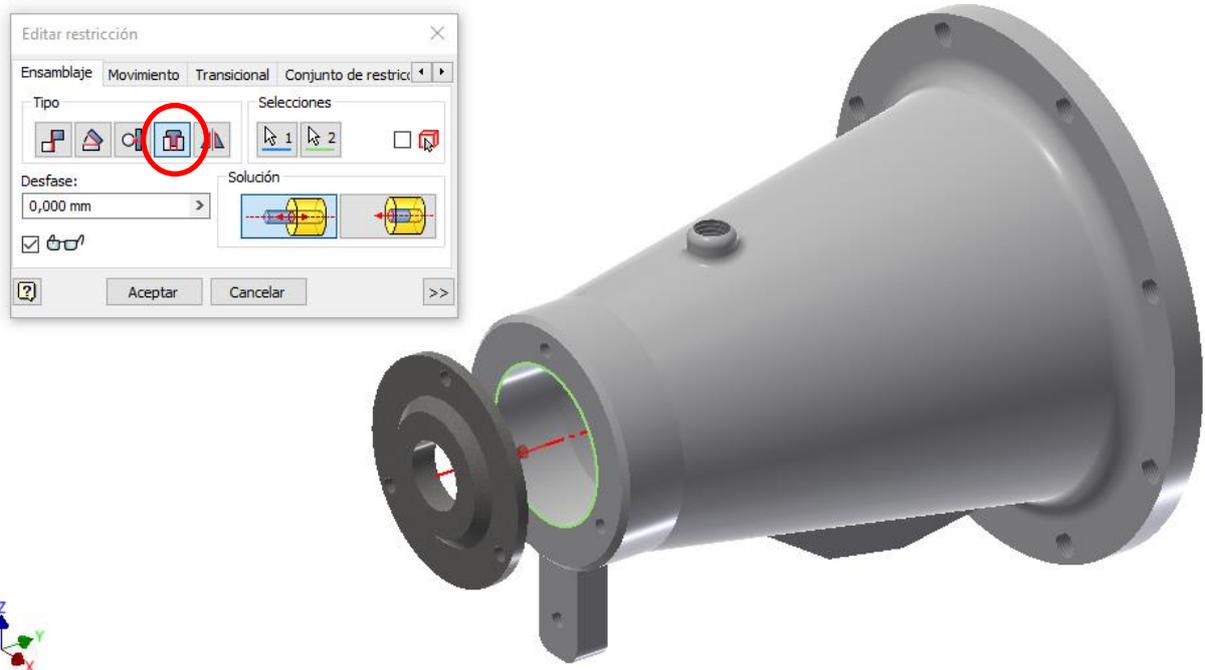


Figura 8-1. Restricción insertar utilizada entre la caja de rodamientos y la tapa

Para restringir dicho GdL se utiliza una nueva coincidencia entre los agujeros de ambas piezas para fijar así por completo la primera tapa de rodamientos. Esta última restricción es la que simula la acción de los tornillos, bloqueando así el giro de la tapa de rodamientos.



Figura 8-2. Ejemplo de la restricción de coincidencia utilizada durante el ensamblaje

Una vez se ha fijado las dos piezas se introducirán los tornillos que fijarían en la realidad ambas partes. Para ello, no es necesario modelar todos los tornillos del ensamblaje, ya que son piezas estandarizadas que se encuentran en el “Centro de contenido” de Inventor.

En el “Centro de contenido” de Inventor, se encuentran todo tipo de piezas normalizadas como: fijaciones (arandelas, pernos, tuercas, tornillos); piezas de eje (anillas de retención, rodamientos, chavetas...); perfiles estructurales, juntas tóricas, casquillos, etc.

Para colocar los tornillos, se selecciona el modelo y la familia deseada y se indica una de las aristas donde irá insertado dicho elemento. Inventor reconoce el agujero y adapta el tamaño tanto en diámetro como en longitud, según los modelos normalizados disponibles para ese tipo de componente. Además, identifica que existe un patrón por lo que colocando un único elemento, se consigue introducir en el montaje los tres tornillos necesarios al mismo tiempo.

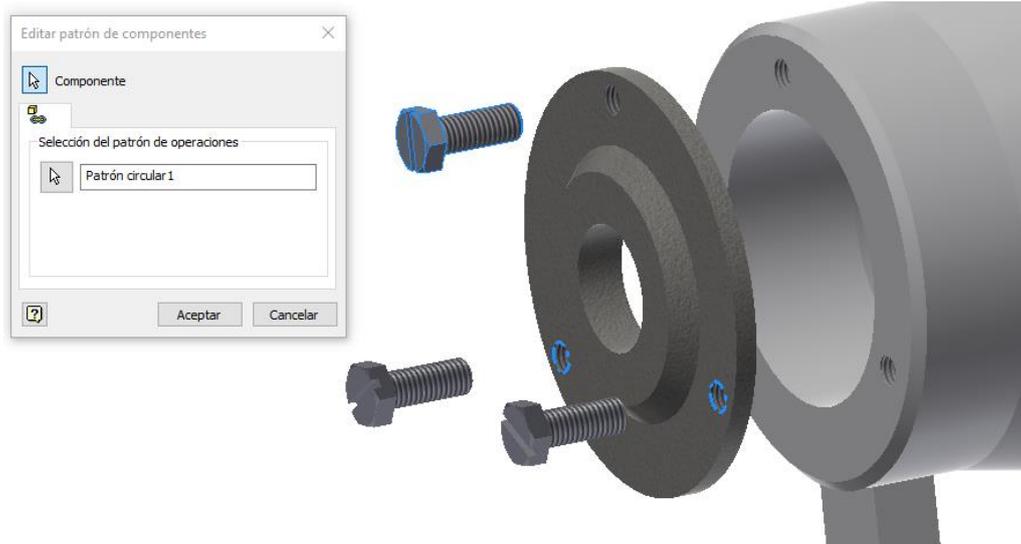


Figura 8-3. Inserción de tornillos en el montaje de la tapa de rodamientos

Posteriormente, se procederá a la colocación del primer rodamiento en la parte final del montaje. Para ello se siguen los mismos pasos que con el tornillo, introduciendo la pieza desde el “Centro de contenido”. De esta forma, no es necesario crear ninguna restricción manualmente.

Una vez ha sido montada la parte posterior de la bomba, se introducirá una de las partes principales en el montaje, el eje. Cuando se modela el eje mediante la herramienta “Design Accelerator” de Inventor, se crea un *.iam* que corresponde a un ensamblaje. Para realizar el montaje, se podría utilizar dicho *.iam*, pero en este caso, se quiere aprovechar el montaje para realizar la simulación dinámica y posteriormente el análisis de tensiones en el eje. Es por ello que es necesario utilizar el archivo *.ipt* propio del modelo. Dicho *.ipt*, se encuentra disponible dentro de la carpeta creada por inventar automáticamente en la ruta del proyecto. Esto se realiza para que a la hora de proceder con el análisis de tensiones, sea posible seleccionar el eje individualmente y no como un ensamblaje. En caso contrario el programa dirá que el eje está montado como ensamblaje y no se podrá realizar el análisis.

Una vez, se tiene el *.ipt* en el ensamblaje, solamente se utilizará la restricción de insertar, seleccionando la arista coincidente del eje con la del rodamiento, automáticamente se alinean sus ejes y se fija su posición en dicha arista, permitiendo el giro en el eje principal, el cual es el fundamento de la máquina.

A continuación, se puede insertar el segundo rodamiento, así como, la segunda tapa de rodamientos con los tornillos correspondientes, siguiendo un procedimiento idéntico al realizado anteriormente.

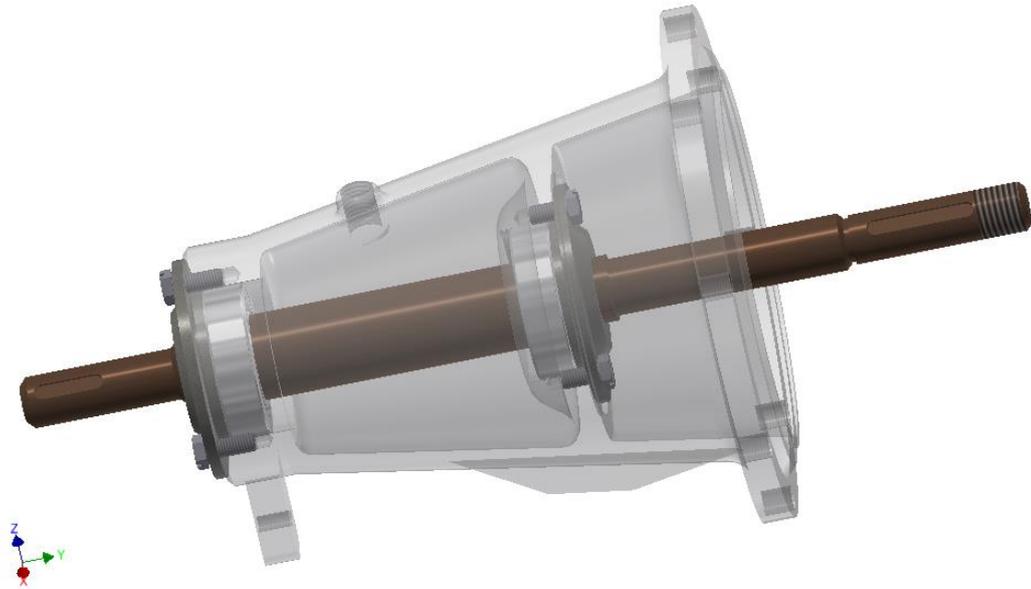


Figura 8-4. Montaje de rodamientos y eje

Seguidamente, se procede al montaje del cierre hidráulico junto con la brida intermedia. Para ello, en primer lugar se coloca el casquillo en el eje mediante la opción insertar comentada anteriormente, de forma que restrinja todos los grados de libertad excepto el de rotación en el eje “y”, posteriormente se realizará lo mismo con la brida intermedia, dejándola fijada junto a la carcasa trasera. Posteriormente se procede igual con el anillo linterna y la estopa. Para finalizar el montaje del cierre hidráulico, se introduce el prensaestopas, realizando una coincidencia entre los agujeros del prensaestopas y la brida intermedia, que sirve de fijación y apriete. Una vez posicionado correctamente el prensaestopas, se procederá a introducir los tornillos desde el “Centro de contenido” como en pasos anteriores. Queda así completado el montaje de cierre hidráulico.

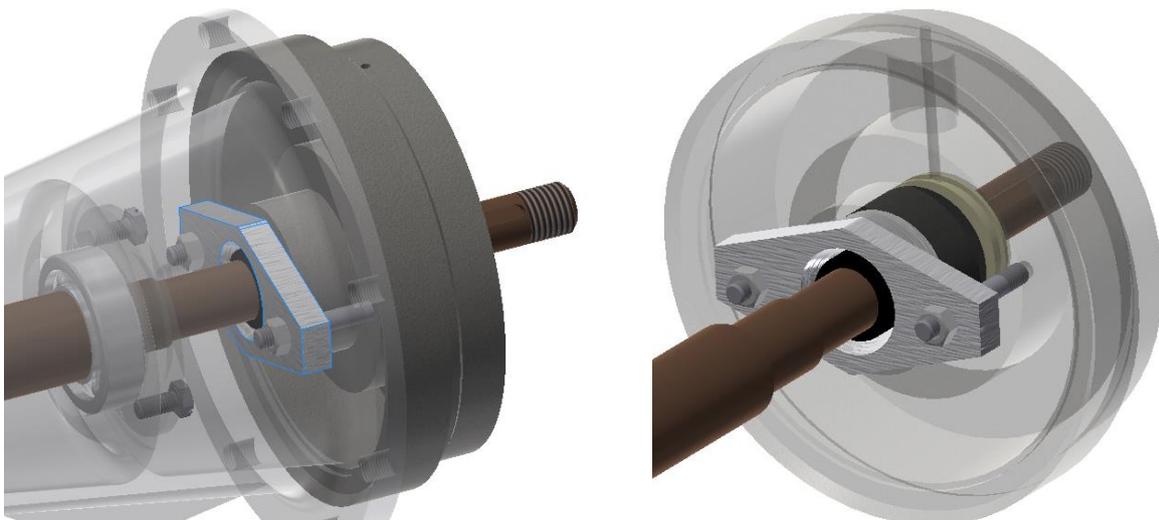


Figura 8-5. Detalle del cierre hidráulico de la bomba centrífuga

El siguiente paso, consiste en la introducción del rodete así como de la voluta. Para ello, en primer lugar se introducirá la chaveta alojándola en el chavetero desde el “Centro de contenido”. Como las dimensiones de la chaveta se adaptan al agujero ya que se ha diseñado según la norma, la chaveta queda fijada y servirá para hacer solidarios al eje con el rodete. Posteriormente, habrá que insertar la parte fundamental de nuestra máquina, el rodete. Un vez se tiene el elemento dentro del entorno de ensamblaje, utilizando las restricciones de coincidencia se hace coincidir los ejes y la cara posterior del rodete con la del casquillo para inmovilizar su recorrido en “Y”. Finalmente, se introduce otra coincidencia entre una cara de la chaveta y el aloja chavetas del rodete para que eje, chaveta y rodete giren solidarios.

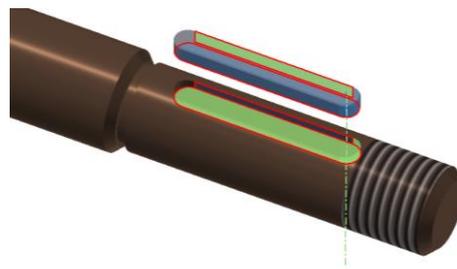


Figura 8-6. Montaje de la chaveta en el chavetero con las diferentes restricciones

Para finalizar el montaje, de la misma forma que anteriormente, se introducirá la tuerca que fija el rodete, la cual se obtiene desde el “Centro de contenido” de nuevo. Este componente permite fijar el eje y el rodete en el eje “Y”, bloqueando el desplazamiento en dicha dirección. Además, se introducirá la voluta, el anillo de desgaste y los espárragos que unen la carcasa trasera con la voluta de forma idéntica a las explicadas anteriormente según las necesidades de restricciones de cada componente. De esta forma, se habrá completado el modelo con todas las restricciones, dejando los grados de libertad necesarios para comenzar con la simulación dinámica.

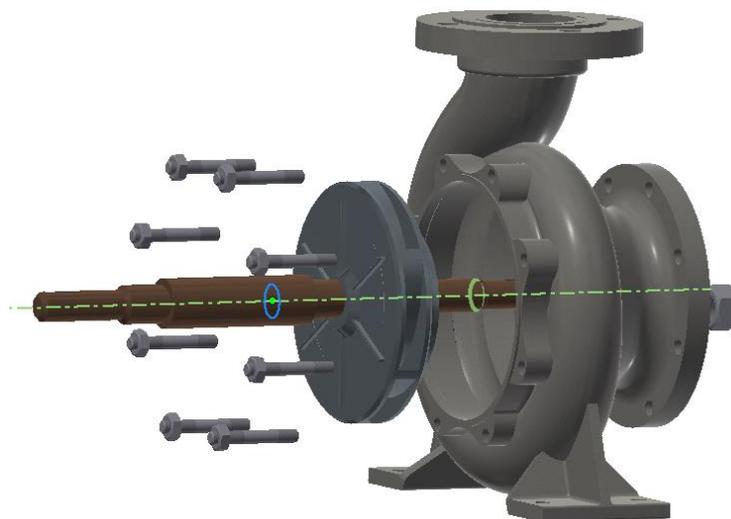


Figura 8-7. Vista explotada de parte de la bomba

En la siguiente imagen es posible ver la bomba centrífuga montada por completo.



Figura 8-8. Montaje final de la bomba centrífuga

9. SIMULACION DINAMICA DE LA BOMBA CENTRÍFUGA

La simulación dinámica de mecanismos es una herramienta imprescindible en el ámbito del diseño industrial. Todo nuevo diseño necesita ser testeado en diferentes aspectos como puede ser los tipos de interferencias en las que incurren los distintos componentes de la máquina, si el mecanismo sigue las trayectorias deseadas o si se puede implementar una mejora en las características principales del sistema. Para ello, construir prototipos físicos resulta complicado y muchas veces ineficiente a la hora de comprobar los aspectos anteriormente mencionados. Por estos motivos, la simulación tanto cinemática como dinámica de modelos digitales es tan importante en la actualidad, mejorando la eficiencia del diseño.

De nuevo, en el mercado existen múltiples software que permiten el análisis de este tipo de mecanismos de forma más potente y precisa. Pero por motivos de continuidad del trabajo, se utilizará Autodesk Inventor Professional 2014, el cual dispone de un módulo para trabajar este tipo de situaciones, *Dynamic Simulation*.

Para proceder con el análisis, se ha seguido una metodología para llegar al resultado final. Los pasos del método son los siguientes:

- 1) Realizar un ensamblaje simplificado del sistema mediante uniones
- 2) Creación de uniones entre componentes
- 3) Creación de condiciones de contorno
- 4) Simulación y análisis

9.1 Montaje simplificado mediante uniones

En Inventor existen dos formas de trabajar para la creación de ensamblajes, por uniones y por restricciones. Para la realización del modelo completo se han utilizado restricciones de movimiento como se ha detallado en capítulos anteriores. En este apartado se explicará el método de uniones, donde se define la posición y el movimiento de los diferentes elementos mediante los diferentes tipos de uniones.



Figura 9-1. Opción "Unión" y "Restringir" en Inventor

La elección de este tipo de montaje es debida a que Inventor trabaja con uniones en la simulación. Por ello, si se usan restricciones el programa tendrá que convertirlas, provocando en ocasiones que dicha conversión no sea sencilla, lo que obliga a crear nuevas uniones.

Existen diferentes tipos de uniones como son: rígida, rotación, corredera, cilíndrica, plana o de bola. En este caso, los únicos elementos móviles son los rodamientos, el rodete y el eje, además todos ellos tienen un movimiento giratorio, por lo tanto, todas las uniones que se coloquen serán rígidas (eliminan todos los grados de libertad) o de rotación (permite el grado de libertad de rotación).

El primer paso para realizar una buena simulación es realizar un ensamblaje simplificado en el que no aparezcan elementos que puedan interferir o complicar el cálculo de las uniones entre componentes y movimientos en Inventor. Partes del modelo que no contribuyen a generar movimiento y que además producen ruido no se tendrán en cuenta. Estas partes son principalmente los elementos de unión (tornillos, tuercas, espárragos) y el cierre hidráulico (estopa, prensaestopas y anillo linterna).

La forma de trabajar con el ensamblaje mediante uniones será la misma que la comentada anteriormente mediante restricciones. Se irá colocando uno a uno los componentes del sistema de forma idéntica al modo de construcción de la bomba real. Como se ha visto, se utilizarán las uniones rígidas para todas aquellas partes que no dispongan de movimiento. Además, se utilizarán tres uniones de rotación para generar el movimiento relativo entre eje y rodamientos como muestra la *Figura 9.2*:

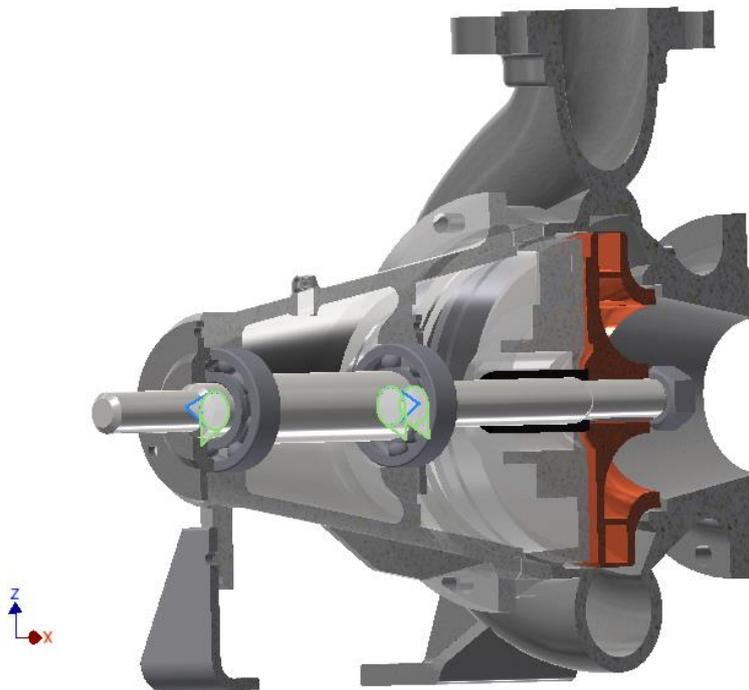


Figura 9-2. Vista seccionada con uniones de rotación

En el caso del rodete, se ha utilizado de nuevo uniones rígidas para fijarlo en el espacio, pero al estar “soldado” al eje mediante la chaveta, tiene permitido el movimiento giratorio junto al eje. De

este modo se completa el ensamblaje simplificado y es posible empezar a trabajar con el módulo “Simulación dinámica” de Inventor.

9.2 Creación de uniones en la Simulación Dinámica

En este segundo paso, se crearán las uniones entre los componentes dentro de lo que será la simulación dinámica. Para ello se pueden seguir dos métodos. Por un lado crear todas las uniones manualmente, lo que permitiría un mayor control en el diseño de la simulación y por otro lado, la creación de uniones automáticamente. Esta última será la que se va a utilizar ya que es la que permite ahorrar más tiempo y gracias a la sencillez del modelo es posible aplicar. Además, el paso anterior realizando el ensamblado mediante uniones permite tenerlas ya creadas.

Para comenzar con la simulación, en primer lugar es necesario moverse al nuevo entorno de trabajo. Para ello se debe seguir la ruta de “Entornos > Simulación Dinámica”. Una vez en el espacio de trabajo correspondiente, se configurará el sistema. El primer paso para ello es seleccionar el botón de “Configuración de simulación”, donde se abrirá un nuevo cuadro en el que es posible personalizar la reproducción. Con motivo de crear las diferentes uniones, se clicará en “Convertir automáticamente restricciones en uniones estándar”, además, se elegirá la opción de “Velocidad angular de entrada en rpm” para que las unidades sean más intuitivas a la hora de trabajar con ellas.

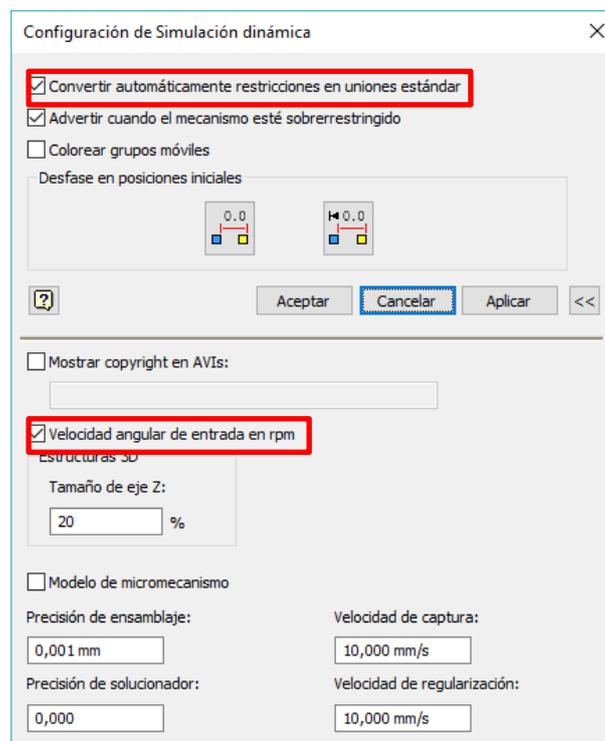


Figura 9-3. Configuración de la simulación dinámica

Al aplicar dichas opciones, se ve como Inventor crea un grupo de componentes fijos, los cuales no tienen permitido el movimiento relativo entre ellos y un grupo de componentes móviles que serán los que tengan el movimiento en la simulación. Además, el software se encarga

automáticamente de crear las uniones estándar necesarias como se ha comentado anteriormente. En el modelo tan solo existen uniones de soldadura y de revolución (entre el eje y rodamientos) como se ha puntualizado anteriormente.

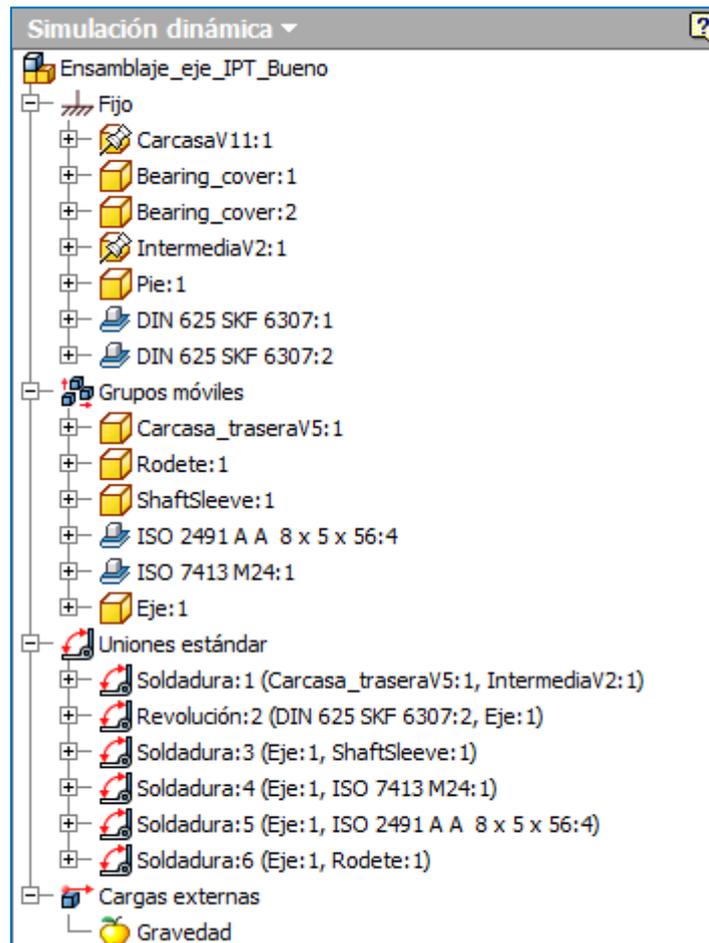


Figura 9-4. Árbol de la simulación dinámica

9.3 Creación de las condiciones de contorno

La siguiente fase de la simulación es la creación del entorno real, es decir, definir las posiciones iniciales, rozamiento en uniones, aplicación de cargas o movimientos específicos. Para simular el modelo, se van a introducir dos pares de torsión, por una parte el par que aporta el motor eléctrico y que permite a la maquina hidráulica mover el fluido. Por otro lado, el agua ejerce una fuerza opuesta al par motor que intenta frenar el rodete, por lo que se debe disponer de dicho par resistente. Cabe destacar, que el objetivo de este estudio es conocer el estado tensional del eje cuando está girando en el punto de mayor rendimiento, es decir, en el nominal de la bomba. Por ello, se realizará un análisis del régimen permanente de la bomba, en el cual se entiende que trabajará la mayor parte de su vida útil. Es por ello, que no se realiza un estudio del transitorio desde que el caudal es cero hasta que alcanza el nominal. En ese caso las condiciones de contorno serían

diferentes y se necesitarían gráficas de ensayos empíricos de la bomba, los cuales no están disponibles.

Para conocer las condiciones en el régimen permanente de la bomba en el punto nominal, se realizarán unos pequeños cálculos.

Según la hoja de especificaciones y las gráficas de funcionamiento de la bomba escogida para el modelado, se recoge toda la información necesaria para calcular el par resistente que ejerce el agua sobre el rodete e intenta frenar la bomba.

Además de dicho par resistente, se calcularán los diferentes rendimientos para mayor conocimiento del sistema.

Se conoce:

N = 2.900 rpm	Q₀ = 150 m³/h	b₂ = 20 mm	D₁ = 120 mm
H_u = 57 mca	η_{mec} = 0.97	b₁ = 37,5 mm	D₂ = 215 mm
β₁ = 37°	β₂ = 28°	ψ₂ = 0,95	α₁ = 90°

Se ha supuesto α₁ = 90° con lo que es posible hacer los cálculos correspondientes para una entrada radial del fluido.

Por definición teórica, el rendimiento hidráulico se calcula mediante la fracción entre la altura útil de la bomba y la altura teórica con un número determinado de álabes.

$$\eta_h = \frac{H_u(Q)}{H_{t,z}(Q)}$$

La altura útil de la bomba es aquella que alcanza con un régimen determinado de revoluciones y con el caudal nominal. En este caso es dato, ya que la proporciona el fabricante mediante la gráfica Q-H. Por tanto, es necesario conocer la altura teórica que proporciona la máquina con siete álabes. Utilizando la teoría de Pfeleiderer se puede conocer, ya que es posible expresarla en función de la altura teórica con un número infinito de álabes.

$$H_{t,z} = \mu H_{t,\infty}$$

De esta forma, la altura teórica con número infinito de álabes se puede expresar en función de la geometría de salida de la bomba, datos que son conocidos. Por otro lado, μ es el coeficiente de Pfeleiderer que se puede calcular mediante los datos conocidos de la siguiente forma.

$$\mu = \frac{1}{1 + \frac{1,2(1 + \operatorname{sen}\beta_2)}{z \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2\right]}} = \frac{1}{1 + \frac{1,2(1 + \operatorname{sen}28^\circ)}{7 \left[1 - \left(\frac{120}{215}\right)^2\right]}} = 0,7321$$

Además, como se ha supuesto que la entrada es radial, se tiene que:

$$H_{t,\omega} = \frac{1}{g} \left[\left(\frac{\pi D_2 N}{60} \right)^2 - \frac{ctag \beta_2 N Q_r}{60 b_2 \varphi_2} \right] = \frac{1}{9,81} \left[\left(\frac{\pi \cdot 0,215 \cdot 2900}{60} \right)^2 - \frac{ctag 28 \cdot 2.900 \cdot Q_r}{60 \cdot 0,02 \cdot 0,95} \right]$$

$$H_{t,\omega}(Q_r) = 108,75 - 487,7 \cdot Q_r$$

Con ello es posible sustituir en la expresión anterior, quedando:

$$H_{t,z} = \mu \cdot H_{t,\omega} = 0,7321 \cdot (108,75 - 487,7 \cdot Q_r)$$

$$H_{t,z}(Q_r) = 79,616 - 357,05 \cdot Q_r$$

Para conocer el rendimiento hidráulico, es interesante disponer de la ecuación anterior en función del caudal nominal, el cual es conocido, en lugar del caudal que pasa por el rodete. Para expresar dicha ecuación en función del caudal nominal, se necesita saber las pérdidas volumétricas que se producen en el rodete durante el funcionamiento de la máquina. Por definición, el rendimiento volumétrico tiene el siguiente valor, tomando el subíndice 0 para valores en el punto nominal:

$$\eta_V = \frac{Q_0}{Q_{r,0}}$$

Para calcular el valor del caudal dirigido por el rodete sin las pérdidas volumétricas, se utilizará la expresión de la potencia interna de la siguiente forma:

$$Pot_{int,0} = Pot_{abs,0} \cdot \eta_{mec} = 31 \cdot 0,97 = 30,07 \text{ KW}$$

Por otro lado,

$$Pot_{int,0} = \gamma \cdot Q_{r,0} \cdot H_{t,z,0}$$

$$30070 = 9810 \cdot Q_{r,0} \cdot (79,616 - 357,05 \cdot Q_{r,0})$$

luego,

$$Q_{r,0} = 0,0495 \text{ m}^3/\text{seg}$$

Por tanto, el rendimiento volumétrico quedará como:

$$\eta_V = \frac{Q_0}{Q_{r,0}} = \frac{0,0416}{0,0495} = 0,84$$

Con lo que

$$H_{t,z}(Q_0) = 79,616 - \frac{357,05}{0,84} \cdot Q_0 = 61,93 \text{ mca}$$

Es posible ahora calcular el rendimiento hidráulico:

$$\eta_h = \frac{H_{u,0}}{Q_{t,z,0}} = \frac{57}{61,93} = 0,92$$

Con lo que el rendimiento global del sistema será:

$$\eta_g = \eta_h \cdot \eta_v \cdot \eta_{mec} = 0.74$$

Por otro lado, para calcular el par resistente que produce el fluido al paso por el rodete y el par aplicado por el motor eléctrico para conseguir la potencia útil que dispone la bomba, se procederá de la siguiente forma:

$$P_{abs} = M_{eje} \cdot N$$

$$M_{eje} = 102,08 \text{ N} \cdot \text{m}$$

y

$$P_u = M_u \cdot N$$

$$M_u = 76,597 \text{ N} \cdot \text{m}$$

luego

$$M_{resistente} = 102,08 - 76,597 = 25,483 \text{ N} \cdot \text{m}$$

A continuación, como se conoce tanto el par motriz ejercido por el motor eléctrico como el par resistente, es posible definir las condiciones de contorno. En primer lugar, se introducirán las cargas originadas en el eje, es decir, los pares. Clicando sobre el botón “Par de Torsión” situado en el panel superior, pedirá entonces que se seleccione una ubicación para dicho par, así como su dirección.

Se introduce en primer lugar el par motriz que genera el motor eléctrico, de valor 102.080 Nmm. Este será ubicado en el extremo izquierdo del eje con la dirección hacia el rodete (regla de la mano derecha) ya que se quiere que la bomba gire en sentido antihorario por diseño. Inventor da la opción de repartir los valores de cargas por tramos y de varias formas como pueden ser constantes, lineales, splines, polinomiales, etc. En este estudio se utilizará un valor constante ligado a una condición de actuación. Esto se consigue seleccionando la opción *Definir condiciones*. Se programará que el par motor este activo mientras la velocidad de revolución del eje sea menor de 2.900 rpm.

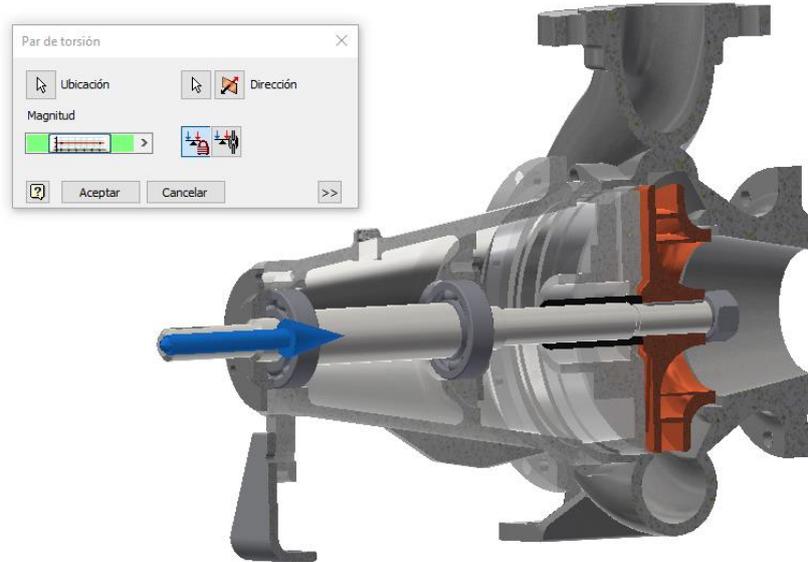


Figura 9-5. Localización del par torsor generado por el motor eléctrico

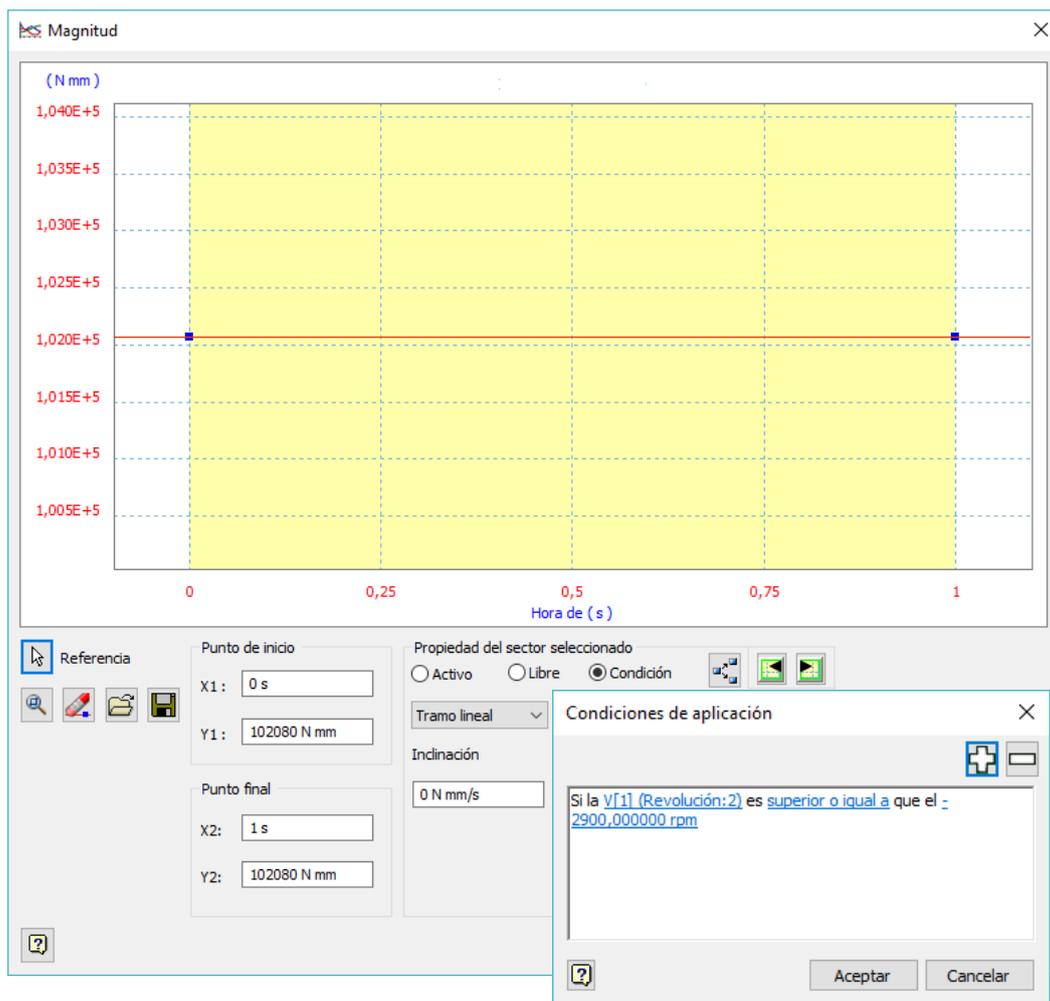


Figura 9-6. Magnitud del par torsor y su condición de aplicación

En segundo lugar, se introducirá el par resistente de la misma forma que en el párrafo anterior. En este caso, se situará en la unión con el rodete de forma que sea en esta región donde se introducen mayor carga de tensiones como sucede en la realidad. La dirección de este segundo par es la contraria a la anterior, es decir, hacia la izquierda de forma que se oponga al movimiento del eje. Esta carga se introduce de nuevo de forma constante ya que simula el régimen permanente de la bomba. De nuevo se introducirá una condición de funcionamiento que consiste en el seguimiento del par motor, es decir, que solo estará actuando cuando el par motor este activo.

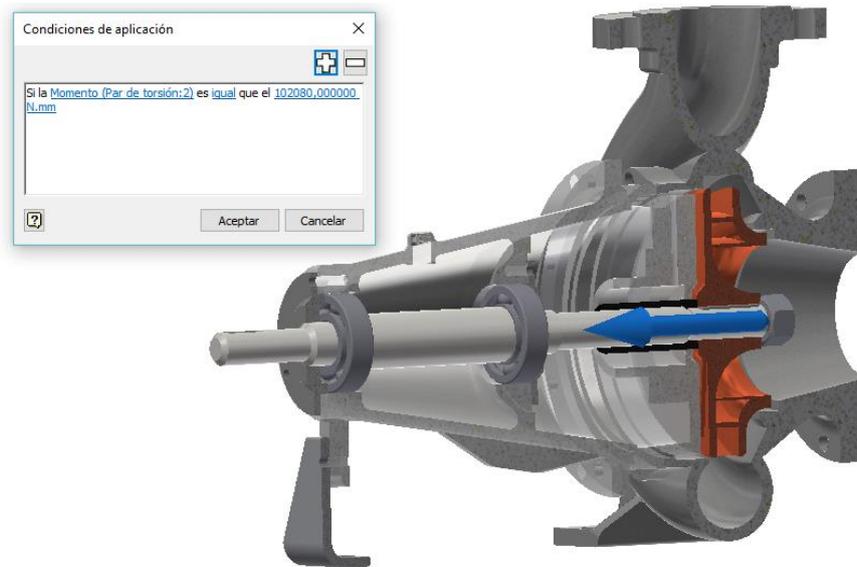


Figura 9-7. Condición de aplicación del par resistente

Por último, serán introducidos los pares resistivos en las uniones debidos al rozamiento entre los componentes, principalmente entre el eje y los rodamientos así como entre el eje y el casquillo metálico. Para ello, se selecciona la unión de revolución que se tiene en el árbol de la simulación y se abre "Editar Par de Unión". En él se introducirán unos valores mecánicos para el análisis dinámico entre máquinas extraídos del libro "Mechanical Engineers' Handbook. M. Kutz.", en el cual se toma este valor para las simulaciones. El Amortiguamiento o coeficiente de rozamiento se supondrá como 0,05 y el coeficiente de fricción seca será 0,2.

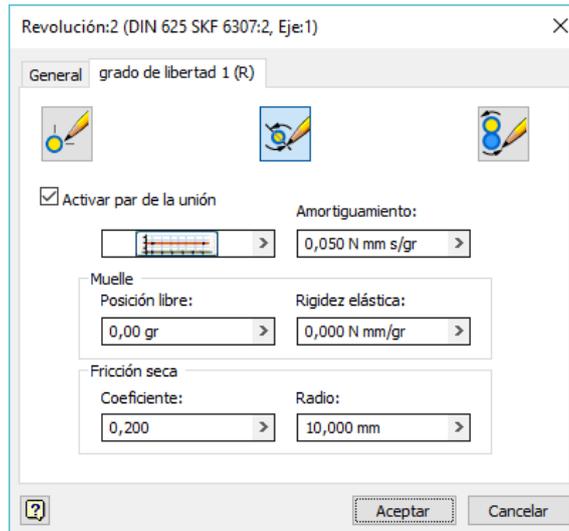


Figura 9-8. Condiciones resistivas en la unión de revolución

Finalmente, solo se necesitará ajustar los parámetros de tiempo de la simulación. En el cuadro de simulación de Inventor, es posible seleccionar el tiempo de la simulación, así como el número de imágenes que se muestran en dicho intervalo de tiempo. Para este caso, se ha seleccionado una simulación de 0,05 segundos con 100 fotogramas (*frames*), tiempo en el que el sistema consigue estabilizarse

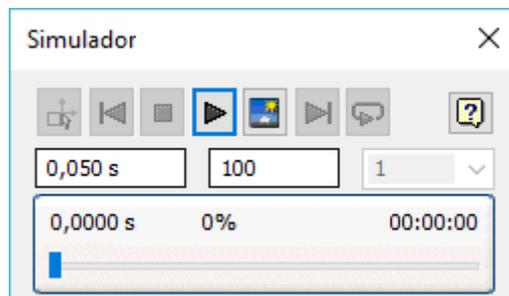


Figura 9-9. Condiciones visuales de la simulación

9.4 Simulación y análisis de la simulación dinámica

Una vez se tienen todos los parámetros necesarios introducidos, es hora de simular el sistema. Es recomendable extraer el gráfico de salida con el que se pueden visualizar en cada instante cómo los valores varían en el tiempo. Para ello se selecciona la opción “*Gráfico de Salida*” y una vez en él, las variables a visualizar. Durante el proceso de simulación es posible observar que el giro del eje junto con el rodete es el esperado. El resultado es el siguiente:



Figura 9-10. Gráfica de resultados de la simulación dinámica

En la gráfica se observa de nuevo el resultado esperado, ya que mientras los pares motor y resistente están actuando, la velocidad va subiendo hasta alcanzar las 2.900 rpm, es decir, el estado de régimen permanente que se quiere analizar. En este instante de tiempo (0,019 segundos) se tienen todas las reacciones actuando sobre el eje y se puede exportar para analizar mediante elementos finitos la situación tensorial.

10. ANÁLISIS TENSORIAL POR ELEMENTOS FINITOS

Una vez se conoce el instante con las sollicitaciones del eje en la unión de estudio, se procederá al análisis mediante el módulo de cálculo por elementos finitos que dispone Inventor. Esta herramienta permite simular de una forma fácil y sencilla las tensiones y deformaciones que sufren los elementos que se quieren analizar, en este caso se va a analizar únicamente el eje.

Para ello, una vez finalizada la simulación dinámica, se seleccionará la opción de “Exportar a CEF”, la cual pedirá que escoger la pieza o piezas a analizar. Una vez seleccionado el eje, se acepta y se requerirá entonces la selección de las caras donde se encuentran las diferentes uniones de la pieza.

A continuación, habrá que desplazarse a la sección de entornos, y elegir la opción de Análisis de Tensión. Una vez dentro de la herramienta, se debe crear una simulación, opción que desplegará un menú con varias opciones. En este paso se podrá dar nombre a la simulación, así como seleccionar el tipo de análisis (estático o modal). Se seleccionará “Análisis estático”, el cual es más sencillo en la operativa de cálculo y conduce a resultados que están más del lado de la seguridad. Además, se deberá marcar la opción “Detectar y eliminar modos de cuerpo rígido”, la cual creará las restricciones necesarias en el caso de que el elemento no este fijado en el espacio junto con la opción “Análisis de cargas de movimiento”, que permite seleccionar diferentes momentos de tiempo, los cuales han sido exportados anteriormente en la simulación dinámica. También es posible cambiar tolerancias en los contactos pero en este caso se mantendrá por defecto en 0,1.

Llegados a este punto, es necesario mallar la pieza. Para ello seleccionando la opción “Vista de malla” el programa hace una mallado automático, acorde a las propiedades de mallado seleccionadas, en este caso:

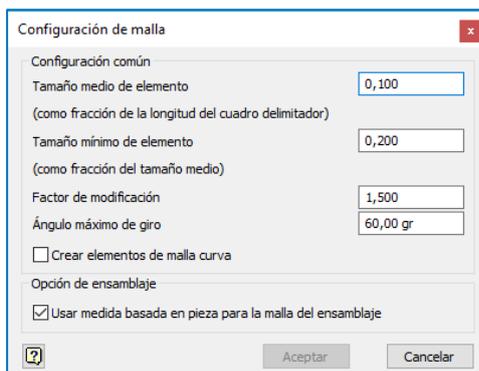


Figura 10-1. Configuración de malla genérica

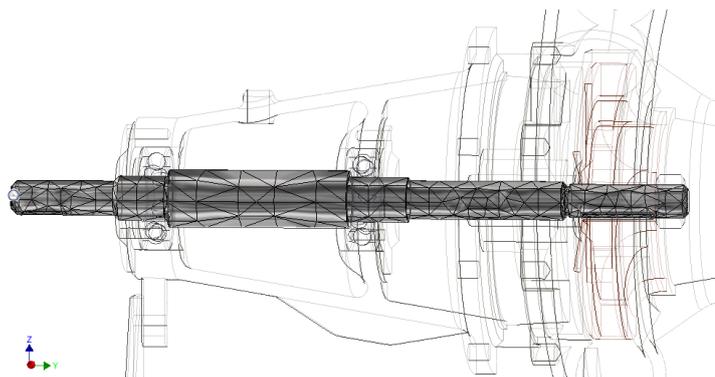


Figura 10-2. Eje con mallado genérico

Para obtener resultados más precisos, se procede a realizar un refinado de la malla, seleccionando la opción “Control de malla local” la cual permite seleccionar la cara o caras a refinar así como el tamaño medio del elemento en dichas caras. En este caso, se ha optado por hacer un refinado a la zona donde el eje se une al rodete por medio de la chaveta, así como en la reducción de sección, donde habrá una mayor tensión.

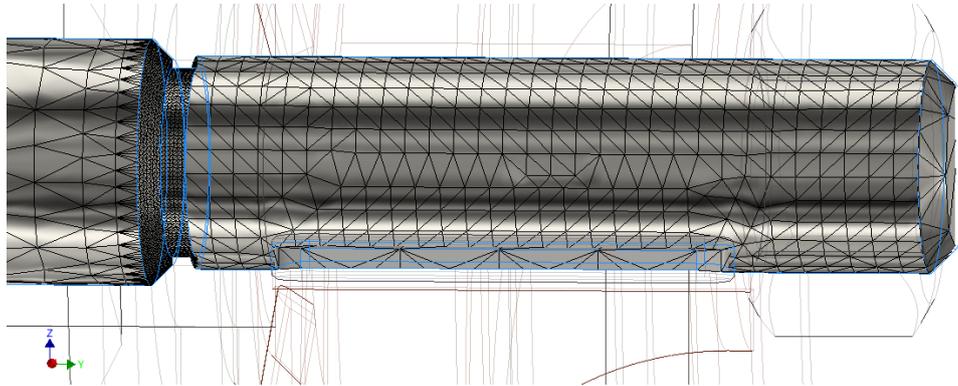


Figura 10-3. Refinado de malla en la reducción de sección (0,2 mm) y la zona del chavetero (2 mm)

Una vez mallado el eje, se puede proceder a la asignación de materiales. Como la hoja de catálogo propone dos materiales diferentes para la construcción del eje (acero inoxidable y acero al carbono), se realizarán ambas simulaciones y se compararán en función de las tensiones ocasionadas. Para ello, se seleccionará el material requerido en el árbol, situado a la izquierda, mediante la opción “Asignar material”, creando ambas simulaciones como se puede ver en la Figura 10-4.

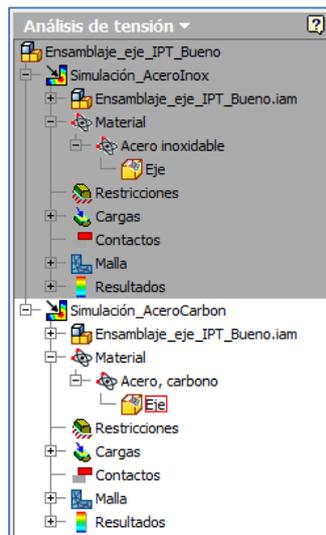


Figura 10-4. Vista del árbol de las simulaciones del eje en ambos materiales

A continuación se muestran las características resistivas asignadas por Inventor a dichos materiales.

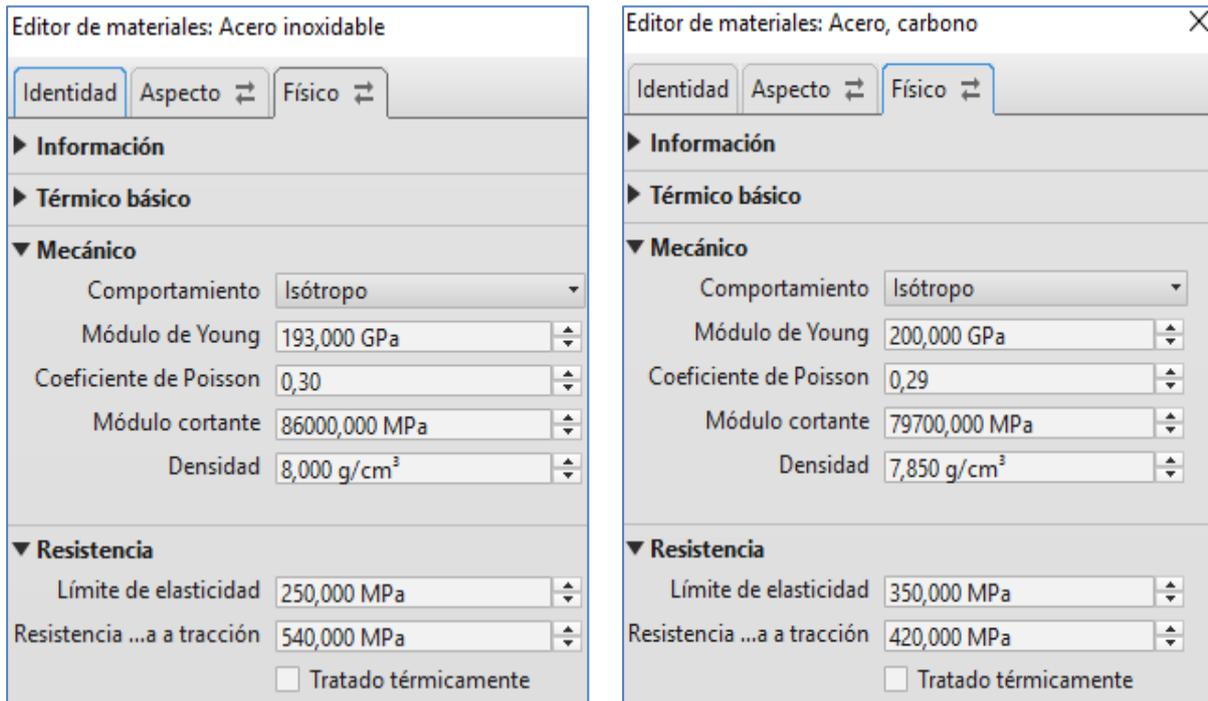


Figura 10-5. Comparativa de las propiedades de los materiales utilizados en la simulación

Una vez definidos tanto los materiales como el mallado del eje, se puede proceder a ejecutar la simulación.

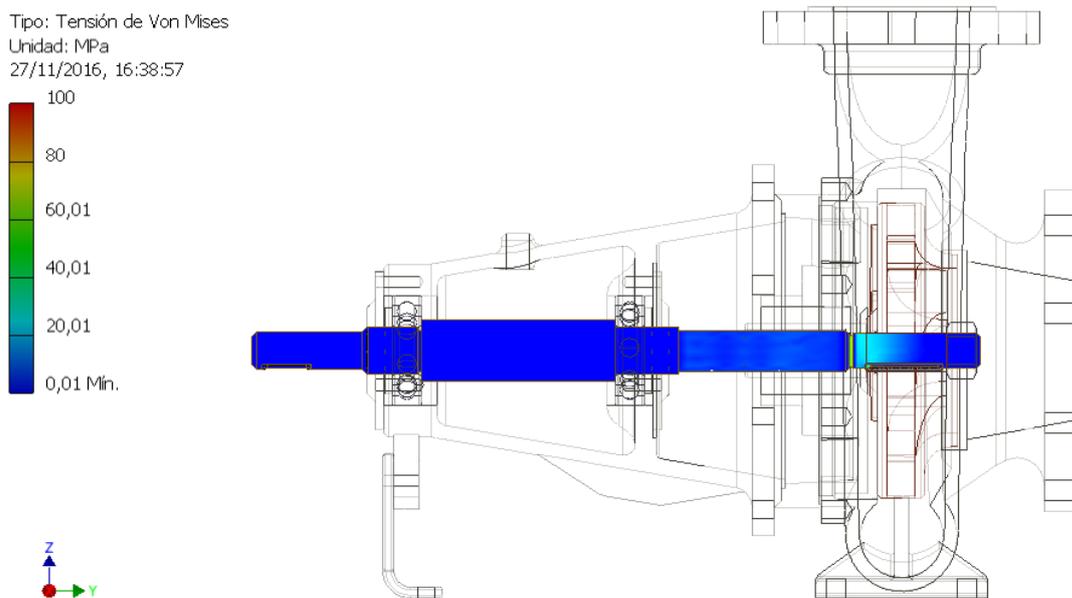


Figura 10-6. Resultado del análisis de tensión

En una primera vista a las tensiones del eje, se puede observar como se comentó anteriormente que las mayores tensiones se originan en la parte que une el eje con el rodete. A continuación se muestra una vista más detallada de la simulación en ambos materiales.

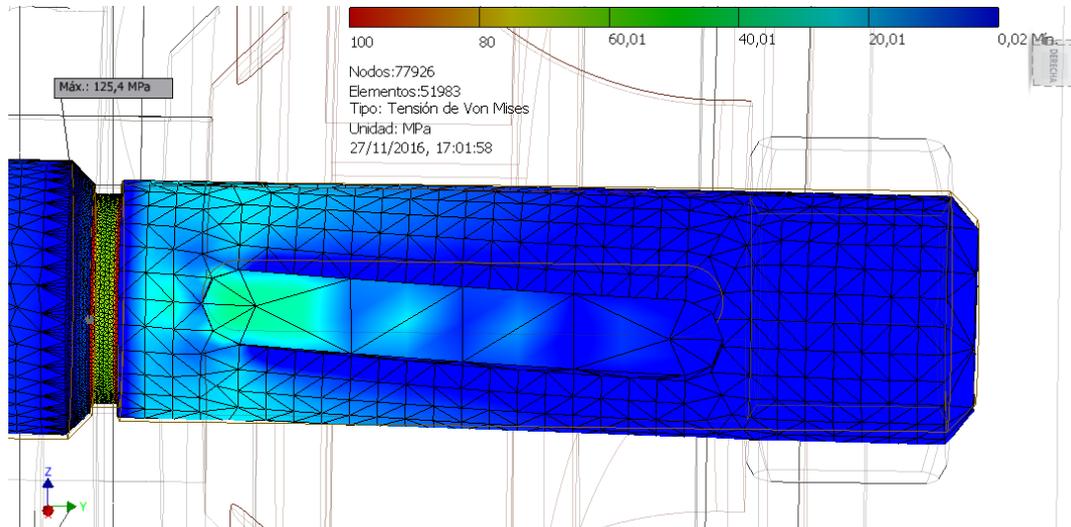


Figura 10-7. Resultado del análisis de tensión en Acero al carbono: 125,4 MPa

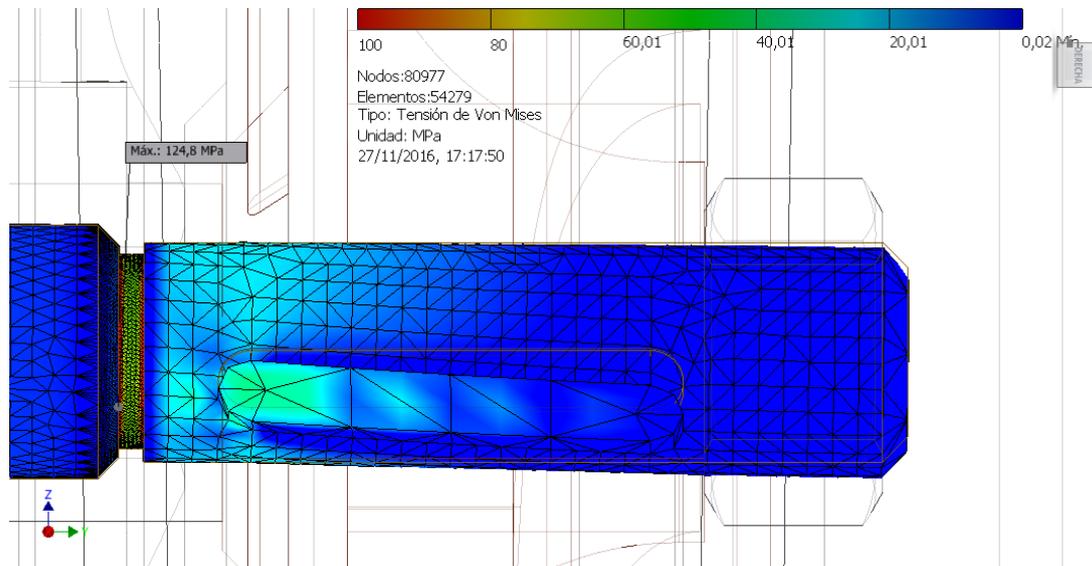


Figura 10-8. Resultado del análisis de tensión en Acero inoxidable: 124,8 MPa

En resultado en los dos es casi idéntico, siendo la tensión máxima de Von Mises de 125,5 MPa en el acero al carbono y de 124,8 MPa en el acero inoxidable. Además, el coeficiente de seguridad es próximo a 2 unidades en el acero inoxidable y 2,79 unidades en el acero al carbono, atendiendo al límite de elasticidad.

Se ha concluido de forma óptima la simulación de las tensiones en el eje, viendo como las tensiones máximas se producen en la zona próxima al rodete, en concreto en el cambio de sección. Esta parte está actuando de concentrador de tensiones.

La presencia de concentradores de tensiones en zonas que sufren una alta carga tensorial podría conducir a un fallo en el sistema por fatiga. Los concentradores de tensiones son normalmente agujeros, cambios de secciones, ranuras, etc. Además, si a la hora de fabricar el componente surge una inclusión no metálica, cerca de la zona de reducción de sección, debida a una deficiencia en el proceso de fabricación, puede ocasionar un aumento en las posibilidades de fallo.

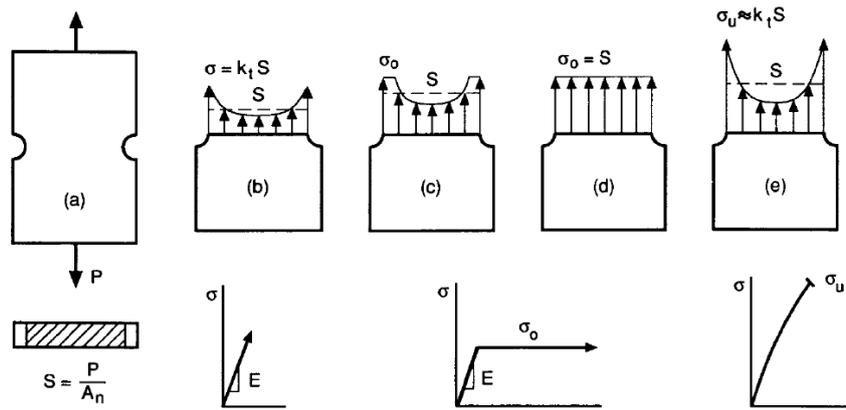


Figura 10-9. Componente con concentrador de tensiones (a) y distribución de tensiones para diferentes casos: deformación elástica (b), fluencia local para un material dúctil (c), fluencia general para un material dúctil (d) y fractura de material frágil (e). Fuente: (“Apuntes Tecnología de Máquinas”)

Por ello, en este caso, como posibilidad de mejora y en previsión de posibles fallos, se ha propuesto un radio de acuerdo de 1 mm y 1,5 mm entre las diferentes secciones, para rebajar la tensión acumulada en dicha zona como se muestra en la siguiente figura:



Figura 10-10. Vista del radio de acuerdo en el cambio de secciones propuesto

Volviendo a realizar la simulación en ambos materiales como se comentó anteriormente, se observa una mejora en la tensión máxima, que baja en 20 MPa gracias a la modificación del diseño propuesta.

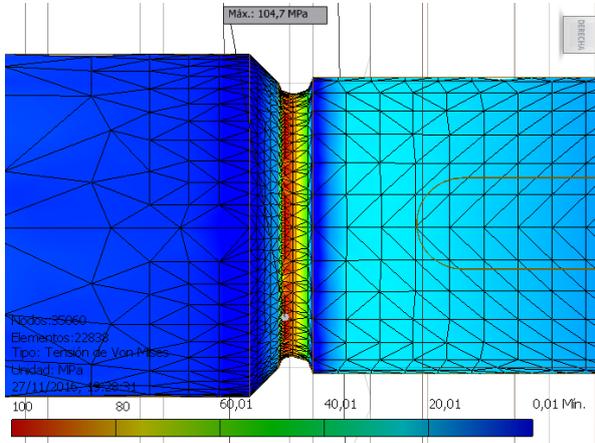


Figura 10-11. Resultado del análisis de tensión tras modificación en Acero al carbono: 104,7 MPa

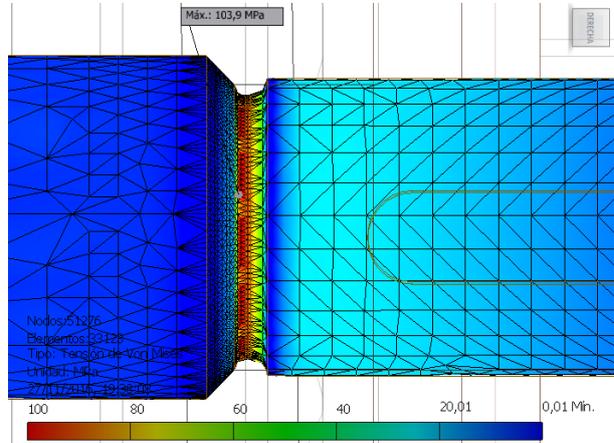


Figura 10-12. Resultado del análisis de tensión tras modificación en Acero al carbono: 103,9 MPa

Con ello, se finalizarían estos apartados dedicados al análisis del eje mediante elementos finitos, viendo que los métodos de simulación por ordenador son muy útiles a la hora de comprobar los diseños y asegurar su robustez antes de la fabricación, sin necesidad de construirlos físicamente.

11. SIMULACIÓN DEL FLUIDO MEDIANTE ANSYS 15.0

Los elementos finitos, son un método numérico, el cual busca aproximar una solución de un modelo físico complejo, que resolverlo de forma numérica sería muy difícil. El principio en el que se basa dicho método es la división del dominio del problema en pequeñas partes llamadas elementos. A dichos elementos, se les aplica las leyes físicas relacionadas con el problema que incumbe, discretizando así la solución.

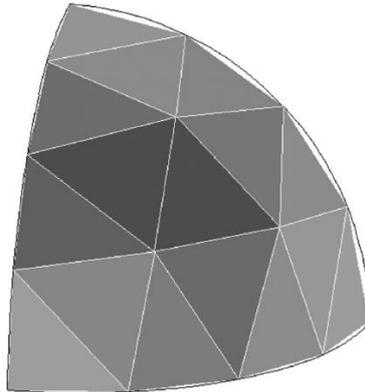


Figura 11-1. Discretización de una sección hemisférica en elementos triangulares

En el siguiente punto se pretende exponer la metodología seguida para modelar el flujo de una bomba centrífuga, analizando su velocidad y la presión a la que está sometido. Para ello se ha utilizado el software de simulación Ansys CFX.

Ansys CFX es un CFD *software* (*Computational Fluid Dynamics*) que permite la resolución de flujos dinámicos, transferencia de calor, reacciones químicas, etc., mediante métodos numéricos como los elementos finitos o volúmenes finitos. Este es utilizado en el ámbito de la ingeniería para simular el comportamiento de los fluidos en la realidad. Algunos de los usos destacados son:

- Aerodinámica de vehículos como automóviles o aviones
- Simulación de la combustión en motores
- Simulación del fluido en bombas y turbinas
- Transferencia de calor
- Reacciones químicas
- Análisis estructurales debidos a vientos
- Riesgos de fuego y explosiones
- Redes hidráulicas
- Refrigeración de circuitos

Se comenzará con la explicación paso por paso de cómo se ha simulado el flujo de la bomba centrífuga. Para ello en primer lugar se ha de tener claro las condiciones en las que se analizará el fluido.

Se va a utilizar las condiciones de diseño que se especifican en el manual de la bomba, que serán las que presumiblemente actuarían en la realidad.

Las condiciones iniciales o los datos de partida para la simulación son los siguientes:

- Tipo de fluido: Agua
- Velocidad de rodete: 2900 rpm
- Presión de entrada: 1 atm
- Caudal: 150 m³/h
- Temperatura del fluido: 25°C
- Transferencia de calor isotérmica

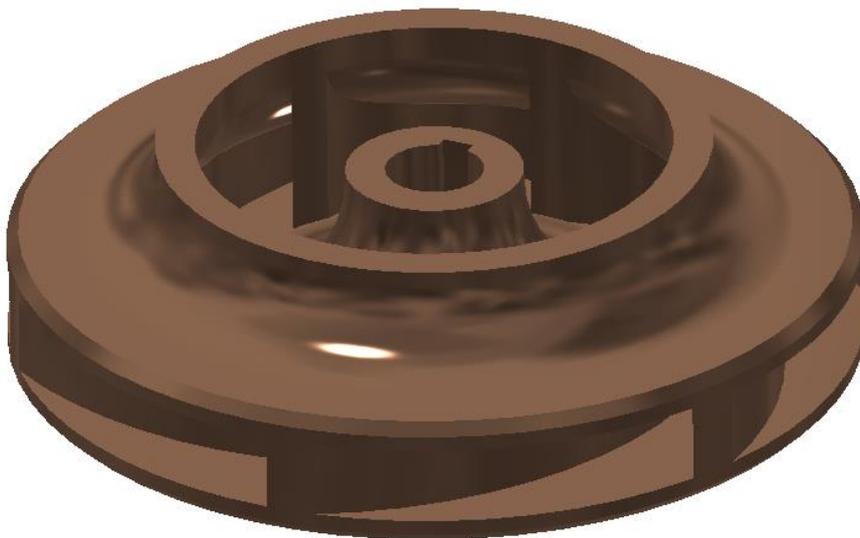


Figura 11-2. Rodete donde se aplican las condiciones de iniciales

11.1 Modelado del flujo

Para comenzar con el análisis del fluido, primero se necesita el modelado de dicho flujo. Para ello, se utilizará de nuevo la herramienta de Inventor.

Para modelar el fluido, se crearán tres partes diferenciadas de fluido (entrada, rodete y carcasa) y finalmente se hará un “ensamblaje” de las tres. Por un lado, se tiene la entrada de agua en la carcasa, la cual se modelará con la extrusión de una simple circunferencia con el radio de entrada.

El caso del fluido que atraviesa el rodete y la carcasa, es sencillo modelar. Para ello solo se debe crear mediante una modificación de los bocetos, un modelo del rodete y la carcasa en bruto, es decir, sin ningún vaciado de material. Una vez se tienen estas figuras, bastará con restar los dos

cuerpos, bruto y normal, para obtener el fluido. En la siguiente imagen se muestra de forma clara el procedimiento seguido.



Figura 11-3. Proceso de modelado del fluido

Una vez se han modelado las tres partes del fluido (entrada, rodete y carcasa), se realizará el ensamblaje de todas ellas mediante restricciones de la misma forma que en el capítulo de montaje.

11.2 Desarrollo del análisis

Teniendo el ensamblaje del fluido, se comenzará a trabajar con Ansys. Se utilizará la herramienta Fluid Flow (CFX). Para empezar, en necesario crear un nuevo proyecto, en el que se trabajará con diferentes módulos. Se arrastra el módulo de CFX sobre el esquema del proyecto, siendo entonces cuando aparece el cuadro con las cinco etapas de definición de condiciones. En ellas se desarrollarán una serie de pasos y configuraciones sobre el modelo para obtener la simulación deseada. En la *Figura 11-3* se pueden observar las etapas a seguir en el módulo de CFX para completar la simulación. Estas son Geometría, Mallado, Configuración, Solución y Resultados.

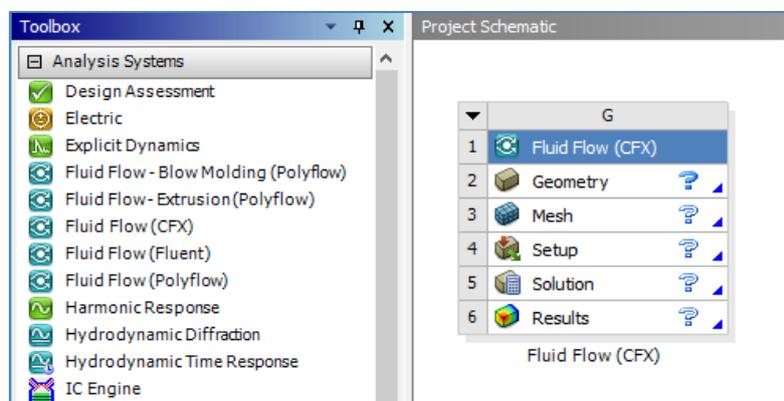


Figure 11-4 Etapas de la resolución del problema en Ansys

11.2.1 Geometría (*Geometry*)

Esta opción permite la creación de geometrías en 3D como podría hacerlo un software CAD. Entre sus herramientas se incluyen la creación de puntos, líneas, extrusión, revolución, patrones, simetrías, etc. Aunque hay que destacar que el modelado CAD en esta interfaz es mucho menos intuitiva de lo que es en un CAD comercial como Inventor. Es por ello y por la complejidad del modelo, que se ha decidido utilizar Inventor y posteriormente importar la geometría.

Para importar el modelo desde Inventor a Ansys en primer lugar se debe guardar el ensamblaje en la extensión de intercambio de datos *.STEP*, la cual se utiliza en la transferencia de datos entre aplicaciones que no comparten el mismo formato nativo. Una vez se tiene el modelo convertido a *.stp*, es posible importarlo a Ansys mediante la opción "*File > Import External Geometry File*". En la *Figura 11-4* es posible ver una pantalla de la geometría del fluido.

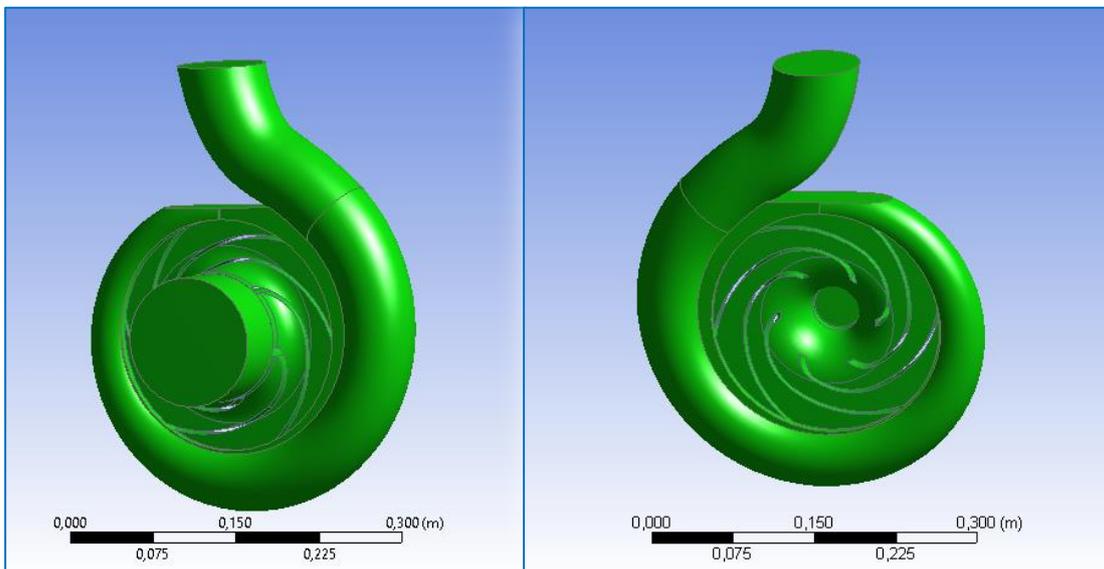


Figura 11-5. Geometría importada en Ansys

El siguiente paso a realizar en *Geometry* es la creación de "*Named_Selection*". Estas son regiones 2D o 3D que servirán de interfaces entre las diferentes zonas del fluido. Serán de gran utilidad para definir las condiciones de contorno más adelante. Para crear las diferentes selecciones únicamente se elegirá la cara o caras a agrupar, se pinchará en botón derecho y se seleccionará la opción "*Named Selection*". Se han creado un total de once grupos para ocupar el grueso de la superficie del fluido, los cuales se muestran en la siguiente imagen:

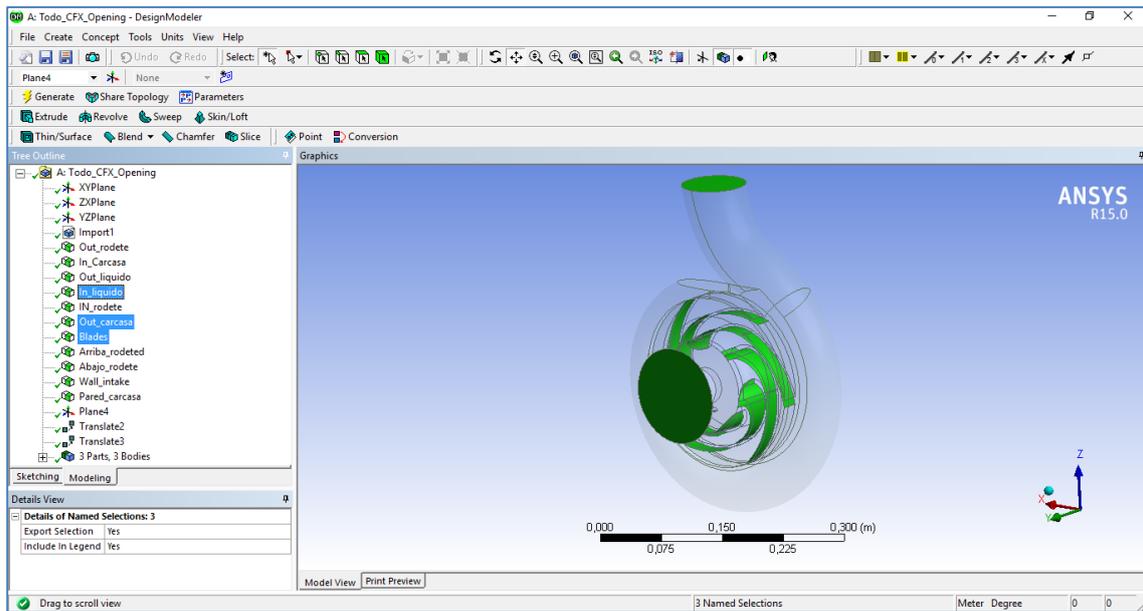


Figure 11-6 Named selection resaltadas

Como se puede observar en la *Figura 11-6*, cada “Named selection” corresponde a una zona del fluido, en concreto se puede ver como resaltadas la entrada del flujo, la pared de los álabes y la salida del líquido. Todas ellas más adelante se definirán como condiciones de contorno para crear el sistema.

11.2.2 Mallado (*Mesh*)

El siguiente paso una vez se tiene la geometría definida e importada en Ansys, es crear un mallado que servirá de base para la resolución del problema mediante la teoría de los elementos finitos.

El problema del mallado es complejo y se puede dedicar mucho tiempo en hacer una buena malla para obtener unos resultados precisos. En este caso, no es objetivo profundizar en todas las opciones de las que dispone Ansys. En su lugar, se propone realizar un mallado automático y ver algunas sencillas opciones que se han utilizado para mejorarlo.

En primer lugar, cuando se entra en el Mallado, Ansys automáticamente reconoce el CAD introducido en la etapa anterior y permite directamente empezar a trabajar con él.

Para generar una malla automática, se debe seleccionar la geometría a la que se desea aplicar dicho proceso en el árbol del proyecto, se presionará el botón derecho y seguidamente se seleccionará la opción “*Generate Mesh*”. Automáticamente Ansys genera un mallado, el cual no da ningún tipo de *warning* por una mala definición de alguna zona del modelo. Pero antes de generarla, se pueden ver diferentes opciones en el cuadro situado a la izquierda “*Details of mesh*”. Para crear una malla al gusto, se pueden cambiar algunas de las opciones disponibles en este cuadro. Unas de

las más representativas son el tipo de geometría de malla que se quiere (triángulos, cuadrados...), máximo y mínimo tamaño de elemento, tipo de transición (rápida o lenta), tipo de suavizado en bordes o la relevancia, la cual implica el refinado que se le aplica a la malla. Es importante tener en cuenta que no se puede hacer un mallado demasiado fino ya que esto implicaría tiempos computacionales elevados. Por tanto, se debe llegar a un compromiso entre un tamaño de malla suficiente para un resultado cercano a la realidad y los recursos informáticos de los que se disponen. Las opciones seleccionadas, así como el resultado final de la malla, se muestran en la siguiente imagen extraída de Ansys:

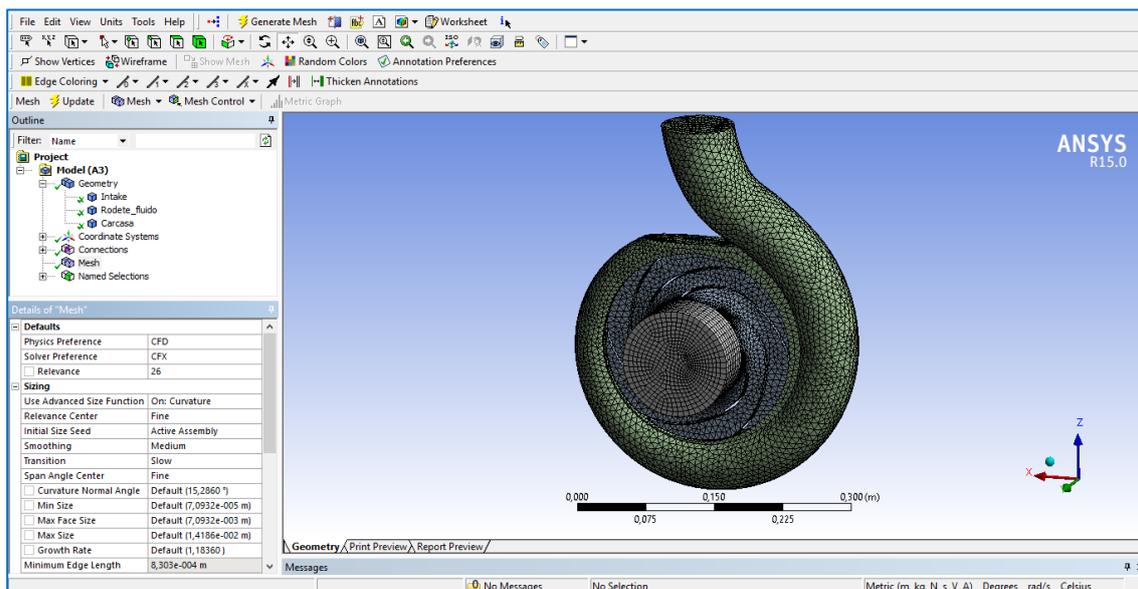


Figura 11-7 Mallado del modelo en Ansys

Adicionalmente, como se ha comentado anteriormente, se puede realizar refinados más precisos de la malla en diferentes zonas o en aquellas partes en las que se cree que el resultado puede tener más relevancia. Además el software también permite realizar mapeados de superficies y otras opciones adicionales.

11.2.3 Configuración (Setup)

Una vez se ha definido y mallado el modelo para que la aplicación pueda realizar los cálculos, toca definir todas las condiciones del sistema.

Estas condiciones de contorno se pueden modificar desde el entorno del “Workspace”. Este contiene diferentes desplegables entre los que se pueden encontrar importación de mallas, condiciones de la simulación, regiones, materiales y expresiones. Dentro del apartado simulación, es posible realizar más de un análisis con diferentes simulaciones. En primer lugar se definirán las características del fluido que se quiere analizar.

11.2.3.1 Definición de dominios

En este caso se disponen de tres partes diferenciadas en el fluido como se ha comentado anteriormente. Por un lado se dispone del agua, que entra desde la boquilla de la carcasa, la cual tiene una presión constante y sigue una dirección recta camino al rodete. Por otro lado se tiene el fluido del rodete, que está girando a una determinada velocidad. Por último, el fluido que atraviesa la carcasa sigue una trayectoria rotativa, pero en este caso es debido al impulso que le da el rodete.

Por lo comentado en el párrafo anterior, es necesario disponer de tres dominios diferentes, uno para cada "tipo" de fluido. Para ello, se clica con el botón derecho en "Flow Analysis 1 > Insert > Domain" y se crean tres diferentes: Rodete, Intake (entrada) y Carcasa. Se completarán las condiciones del sistema pulsando doble clic sobre cada uno:

En la pestaña de "Basic Setting" se modificarán las siguientes opciones:

- Location (Localización): En esta opción, se elige la geometría que va a formar parte del dominio que se está definiendo. En este caso, se tomará en cada dominio la geometría que corresponda.
- Domain Type (Tipo de dominio): Se define el dominio como "Fluid Domain" (es posible deformar la malla y simular el movimiento de las fronteras). Será común para los tres dominios.
- Fluid and Particle Definition (Definición del fluido): El siguiente paso es crear un nuevo fluido, este será nombrado como "Water". Dentro del recuadro, se le asignará el material "Water" de la librería, el cual tiene las propiedades físicas del agua ya definida por defectos. De nuevo, esta opción se deberá completar en los tres apartados
- Morphology (Morfología): Como morfología del fluido se selecciona "Continuous Fluid".
- Reference Pressure (Presión de referencia): Esta ajusta la presión absoluta a la cual todas las demás presiones de la simulación se referencian. Por tanto, se elige la presión atmosférica de 1 atm.
- Domain Motion (Movimiento del dominio): Apartado de elevada importancia, ya que definirá el tipo de movimiento que realiza el fluido. Para Intake y Carcasa, se tomará un movimiento "Stationary". En cambio, para el dominio del Rodete, se asignará "Rotation", dándole una velocidad angular de 2.900 rev/min. Además, se debe definir el eje en el que el rodete girará. En este modelo, el eje de rotación se corresponde con el Y.

En la pestaña "Fluid Models", tipo de turbulencia, se seleccionará "K-epsilon". Este es uno de los tipos de turbulencia más utilizados en los códigos CFD, siendo considerado un estándar en la industria. Es un modelo estable y numéricamente robusto que ofrece unos buenos resultados cumpliendo un buen compromiso entre precisión y robustez de cálculo.

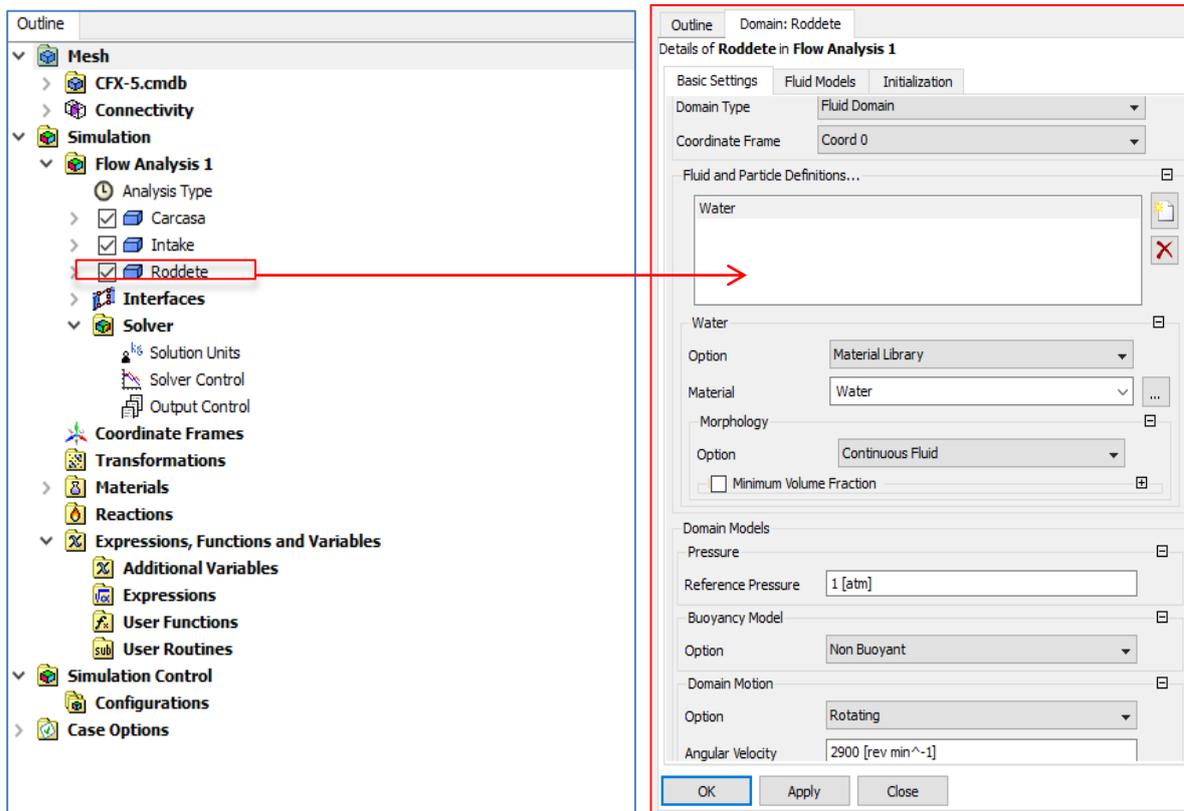


Figura 11-8 Diferentes dominios y sus opciones

11.2.3.2 Condiciones de contorno

Una vez se han definido los dominios, es el momento de añadir las condiciones de contorno que simulen la parte móvil del sistema, la parte fija y las interfaces entre los diferentes dominios.

Para insertar una condición de contorno, se debe clicar con el botón derecho en “Domain > Insert > Boundary”. Una vez se ha hecho, se abrirá un ventana automáticamente, donde se definirán las características de dicho límite.

Existen cinco diferentes tipo de condiciones de contorno para fluidos.

1. *Inlet* (Entrada): El fluido principalmente entra en el dominio.
2. *Outlet* (Salida): El fluido predominantemente sale del dominio.
3. *Opening* (Abierto): El líquido puede simultáneamente salir y entrar del dominio. Esta situación se suele dar en condiciones con más de un fluido presente en el sistema.
4. *Wall* (Pared): Corresponde con un límite impenetrable para el fluido.
5. *Symmetry Plane* (Plano de simetría): Simetría con respecto a la geometría y al flujo.

Existen una serie de recomendaciones para la introducción de valores en las condiciones del fluido. Según el tipo de valores iniciales que se seleccionen, el cálculo puede ser más robusto o menos. Entre ellas, cabe destacar la introducción del valor de la presión total de entrada en la condición “*Inlet*” y el caudal de flujo a la salida en la condición de “*Outlet*”. Esta será la utilizada ya que ambas son datos de partida.

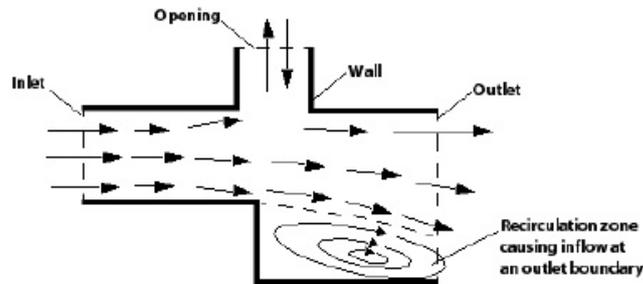


Figura 11-9. Tipos de condiciones de contorno en un fluido

- Condiciones de contorno en la entrada (Intake): En esta parte del modelo se tienen tres condiciones de contorno o *boundaries*, una para la entrada de fluido, otra para la pared que corresponde con el acero de la carcasa y por último la salida, la cual comparte condiciones con la entrada al rodete.

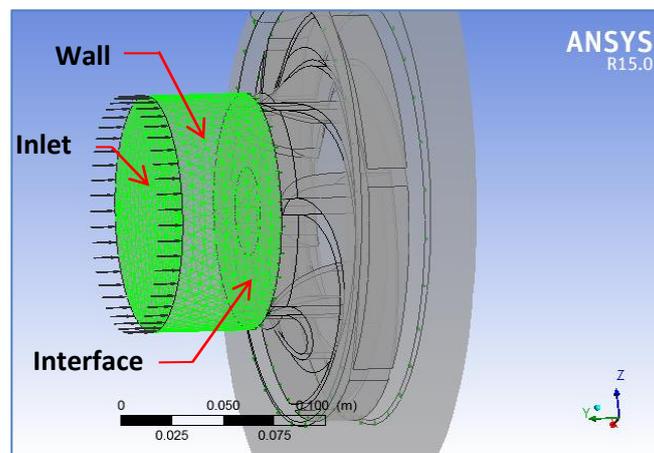


Figura 11-10. Condiciones de contorno para la entrada del fluido

- Pared: En ella simplemente se modificará el tipo de condición a “*Pared (Wall)*”, lo que transforma la superficie exterior de la geometría en una pared, simulando el acero de la bomba. Además, se mantendrá la opción “*No-Slip Condition*”, la cual asume que el fluido tendrá velocidad relativa cero con respecto a los límites sólidos, es decir, que las moléculas más externas del fluido, estarán pegadas a la

pared de la carcasa debido a que la adhesión de la pared al fluido es más fuerte que la cohesión de las moléculas de agua entre sí.

- Entrada: Dicha condición corresponde a la entrada del fluido en la carcasa, la cual se modeló aparte. Como “Boundary Type” se selecciona “Entrada (Inlet)”, y en la localización, se utilizará la “Named selection” (ver apartado 11.2.1 Geometría) coincidente con la superficie de entrada. Además, en la pestaña de “Boundary Detail”, se elige la opción “Total Pressure”. En ella, se dará como valor la presión atmosférica. Con ello se habrá definido la primera de las condiciones de contorno del sistema.

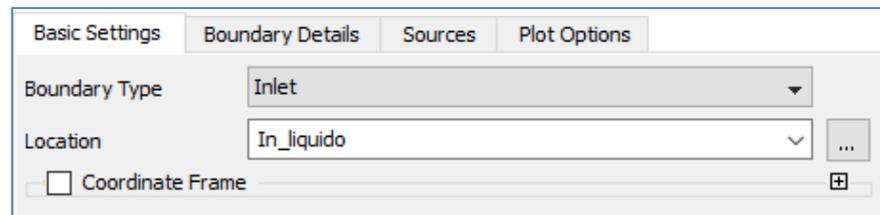


Figura 11-11. Configuración básica de una condición de contorno

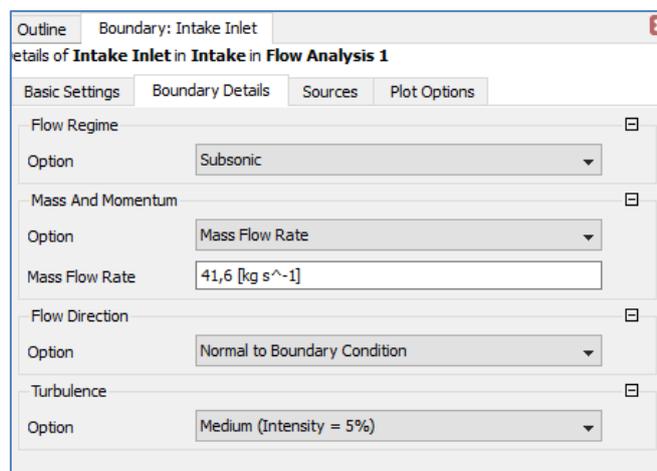


Figura 11-12. Configuración detallada de la condición de contorno de la entrada

- Interfaz en rodete-entrada: Esta condición de contorno será del tipo “Interfaz (Interface)” y está localizada en la superficie de salida del líquido. Las demás opciones se dejarán por defecto.

- Condiciones de contorno en el Rodete: Para la parte del rodete, se han creado cinco límites, dos de tipo “*Interfaz (Interface)*”, que corresponden con la entrada del fluido en el rodete y con la salida del agua a través de la voluta, y otras tres de tipo “*Pared (Wall)*”, que simulan la parte superior, inferior y álabes del rodete.

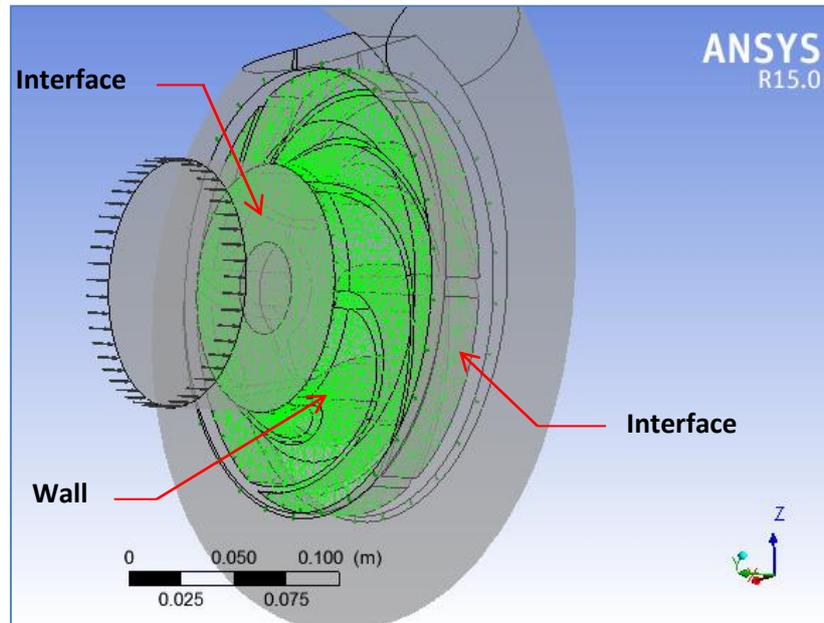


Figura 11-13. Condiciones de contorno para el rodete

- Condiciones de contorno en la Carcasa: En este caso se han utilizado de nuevo tres tipos de condiciones. Por un lado, la condición de “*Pared (Wall)*”, simulando la pared de la voluta, por otro lado, la condición de contorno de “*Interfaz (Interface)*” para la superficie compartida entre carcasa y rodete. Y por último una nuevo límite aplicado a la salida del fluido por la bomba. Esta condición es de tipo “*Salida (Outlet)*”. Además, en la pestaña de “*Boundary Detail*” se tomará la opción “*Mass Flow Rate*” y se introducirá el caudal que da la bomba: 41,6 kg/seg.

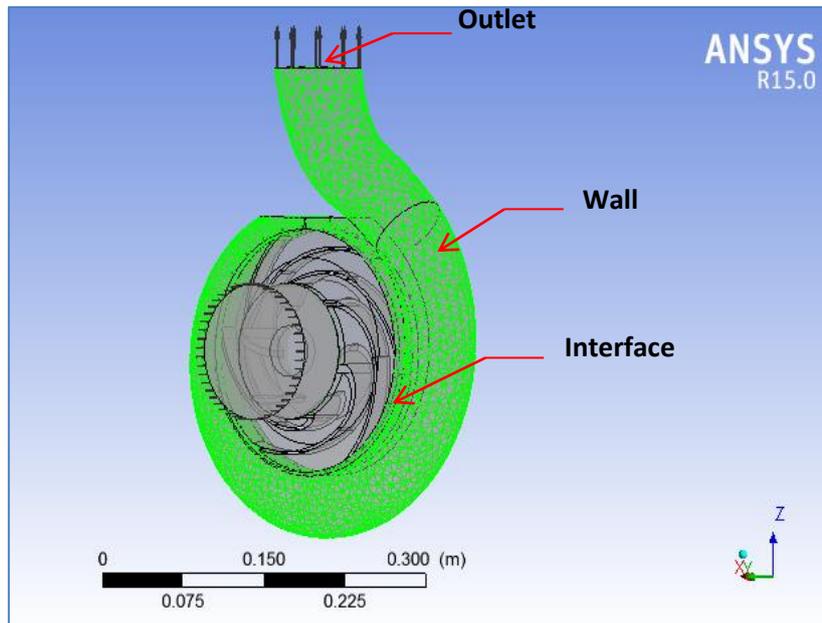


Figura 11-14. Condiciones de contorno para la carcasa

Con ello, se habrán definido todas las condiciones que intentan simular el entorno de la realidad. Además, el sistema estará restringido lo suficiente para que Ansys pueda realizar los cálculos y dar una solución ajustada.

11.2.4 Resolución (*Solution*)

Una vez completada toda la configuración del modelo, es el momento de simular el sistema. Para ello, La siguiente etapa es la de resolución del problema o "*Solution*" en Ansys. En él aparece una ventana en la que se configura cómo será el cálculo.

En este caso se seleccionará "*Double-precision*" y la opción de "*Platform MPI Local Parallel*". Este modelo de cálculo divide la malla en un número determinado de particiones, las cuales serán resueltas por diferentes procesadores. La primera malla es descompuesta en dos de igual tamaño aproximadamente. La descomposición es entonces repetida hasta que el número de particiones requeridas se han obtenido. Se ha elegido una resolución con 4 particiones como muestra la siguiente imagen:

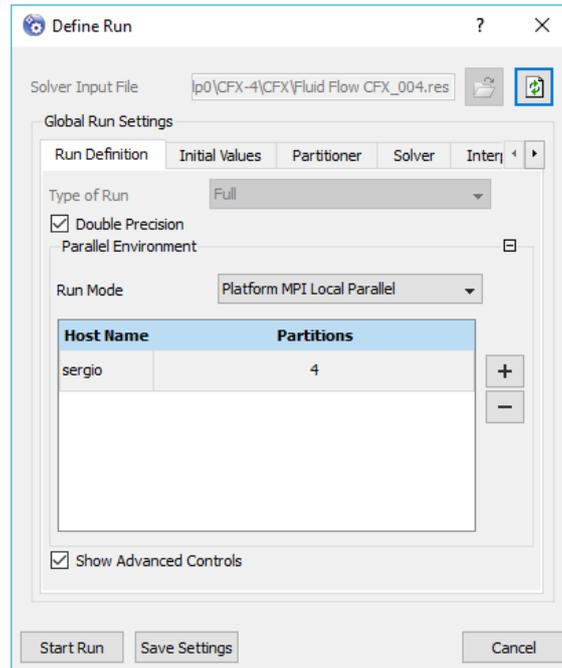


Figura 11-15. Definición del tipo de resolución utilizada

Una vez definidas las condiciones de la simulación, se comienza con ella seleccionando “*Start Run*”. Aparecen entonces unas gráficas donde se muestra la evolución de distintos parámetros calculados y su evolución frente a las iteraciones de cálculo. La simulación se está procesando mientras se llega a un número de iteraciones determinado o bien cuando converge lo suficiente a un valor estipulado.

En el lado derecho de la pantalla se pueden observar los resultados que se obtienen así como el número de iteraciones que se están realizando. En nuestra simulación, el software ha necesitado 769 iteraciones para llegar a converger en una solución con un residuo suficientemente pequeño.

```

Out File
=====
OUTER LOOP ITERATION = 769                      CPU SECONDS = 7.792E+03
=====
|      Equation      | Rate | RMS Res | Max Res | Linear Solution |
+-----+-----+-----+-----+-----+
| U-Mom              | 1.00 | 1.0E-04 | 5.0E-03 | 2.4E-03 OK|
| V-Mom              | 1.00 | 5.1E-05 | 1.6E-03 | 2.5E-03 OK|
| W-Mom              | 1.00 | 5.3E-05 | 1.6E-03 | 2.2E-03 OK|
| P-Mass             | 1.00 | 1.3E-06 | 3.9E-05 | 4.9 9.1E-02 OK|
+-----+-----+-----+-----+
| K-TurbKE           | 1.00 | 1.7E-04 | 5.8E-03 | 5.5 4.4E-06 OK|
| E-Diss.K           | 1.00 | 2.0E-05 | 6.7E-04 | 11.9 1.1E-05 OK|
+-----+-----+-----+-----+

CFD Solver finished: Mon Oct 24 20:32:10 2016
CFD Solver wall clock seconds: 1.9437E+03

=====
Termination and Interrupt Condition Summary
=====

CFD Solver: All target criteria reached
(Equation residuals AND global imbalances)

=====
Boundary Flow and Total Source Term Summary
=====

+-----+-----+-----+
|                                     U-Mom-Carcasa                                     |
+-----+-----+-----+
Boundary      : Carcasa Default                      6.7475E-01
Boundary      : Carcasa Outlet                      -2.8201E+02
Boundary      : Carcasa to Roddete Side 1           1.6888E+02
Boundary      : Pared Carcasa                       2.7566E+01
Domain Interface : Carcasa to Roddete (Side 1)       8.5499E+01
-----

```

Figura 11-16. Extracto del estado de la simulación

Con la simulación finalizada ya es posible comenzar a explorar y analizar los resultados obtenidos.

11.2.5 Resultado (Results)

La última etapa del análisis fluidodinámico en Ansys es la obtención de los resultados y su posterior interpretación. Para representar los resultados se ha optado por la creación de un plano en XZ que corta transversalmente al eje del rodete por el punto medio, en el que se puede hacer un muestreo de las diferentes variables a observar. Para ello, se clicará en “Location > Plane” y mediante la selección del plano deseado y su distancia al origen, este se creará. Una vez se tiene el plano en el que se proyectarán los resultados, se elegirán las variables presión y velocidad, obteniendo lo siguiente:

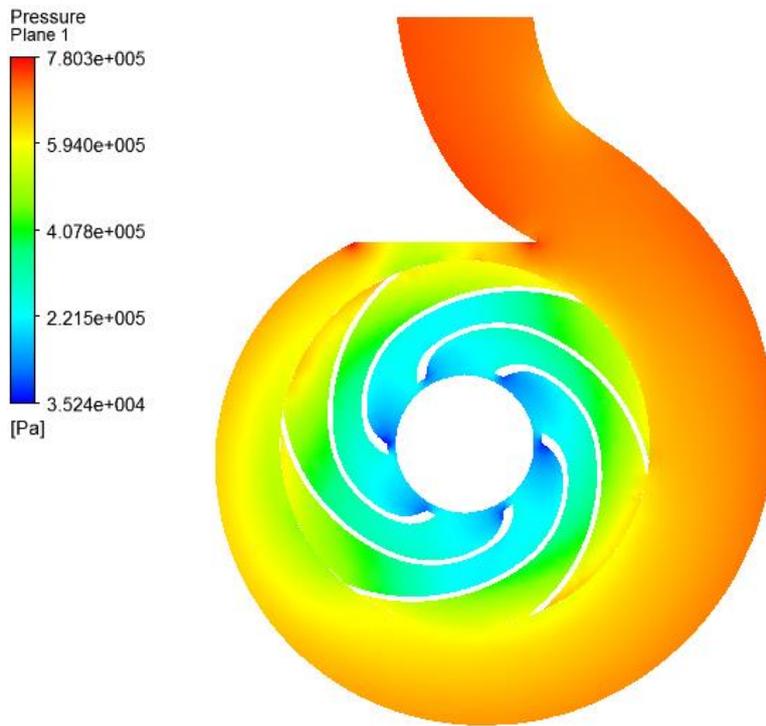


Figura 11-17. Evolución de la presión del fluido a lo largo del rodete y la voluta

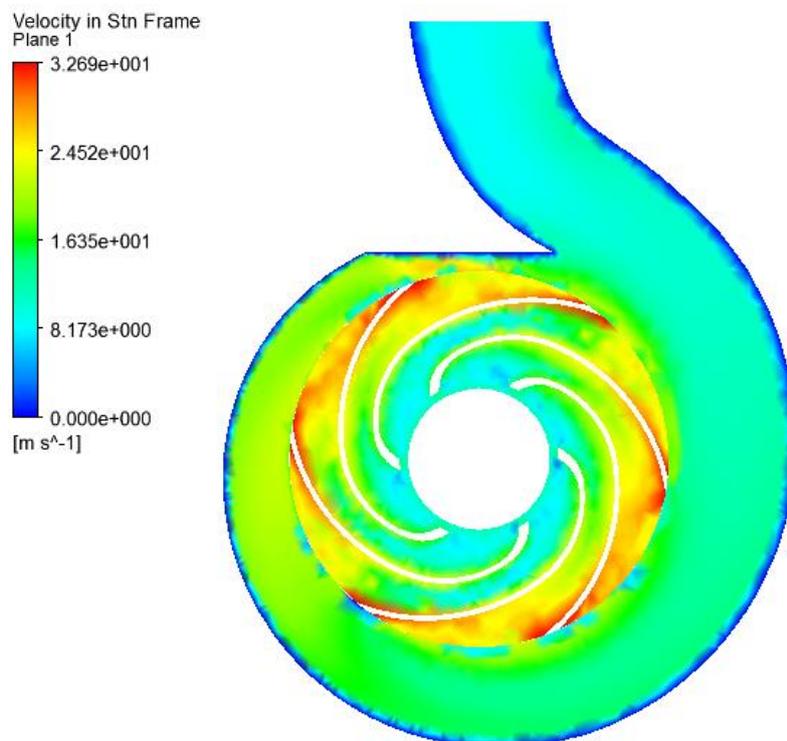


Figura 11-18. Evolución de la velocidad del fluido a lo largo del rodete y la voluta (corte transversal)

Además, se pueden representar los resultados en un formato 3D, de la misma forma que se ha explicado anteriormente. Únicamente, en lugar de seleccionar un plano, se le dará visibilidad a cada contorno creado:

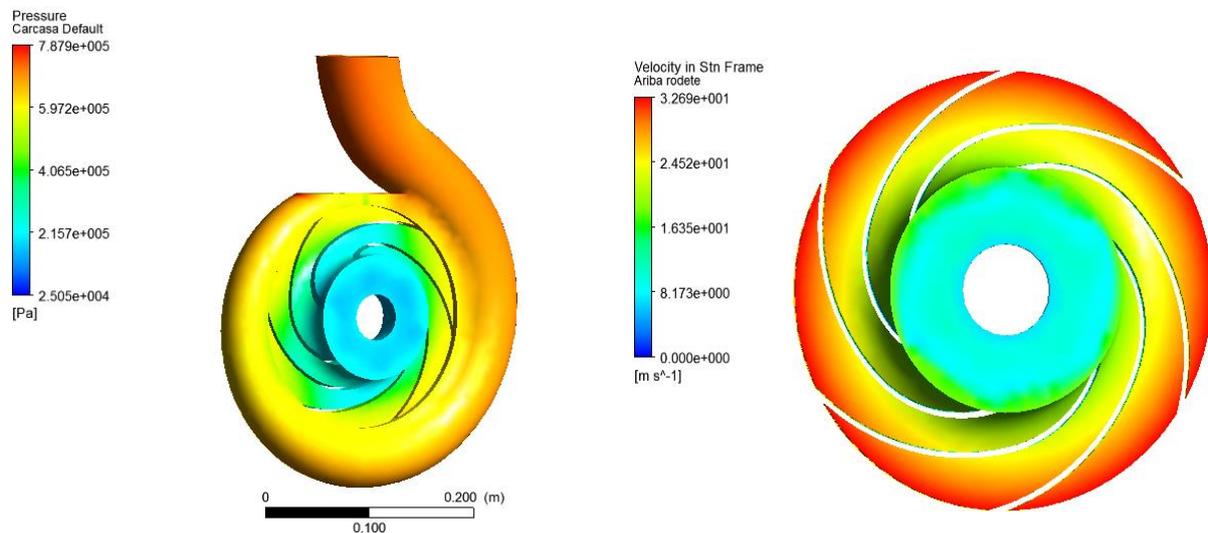


Figura 11-19. Vista 3D de la evolución del fluido en presiones (izquierda) y en velocidades (derecha)

En las Figuras 11-16, 11-17 y 11-18, se puede ver cómo la presión evoluciona a lo largo del rodete y la carcasa. En ella, se observa como a medida que las partículas de flujo van avanzando por el rodete, aumentan su presión, pero es en la voluta, donde se experimenta la mayor subida de presión hasta alcanzar los $7,803 \cdot 10^5$ Pa en la descarga. Además, se ve que en el paso del fluido por el rodete este va experimentando un aumento de velocidad de forma progresiva que pierde posteriormente en la voluta.

En vista a los resultados, se puede corroborar la principal característica de la máquina, que consiste en transformar la energía motriz (motor) en velocidad (rodete), para después transformarla en presión a través de la voluta.

Además, de los resultados, se puede extraer que existe una diferencia de presiones entre la cara delantera del álabe, la cual actúa de cara activa y la cara trasera que ejerce de cara pasiva. Esto se debe a que la cara delantera está realizando un empuje sobre el fluido. Dicha diferencia de presiones, es la que produce que aparezca una fuerza neta sobre el álabe, que se traduce en el par teórico necesario para impulsar el rodete:

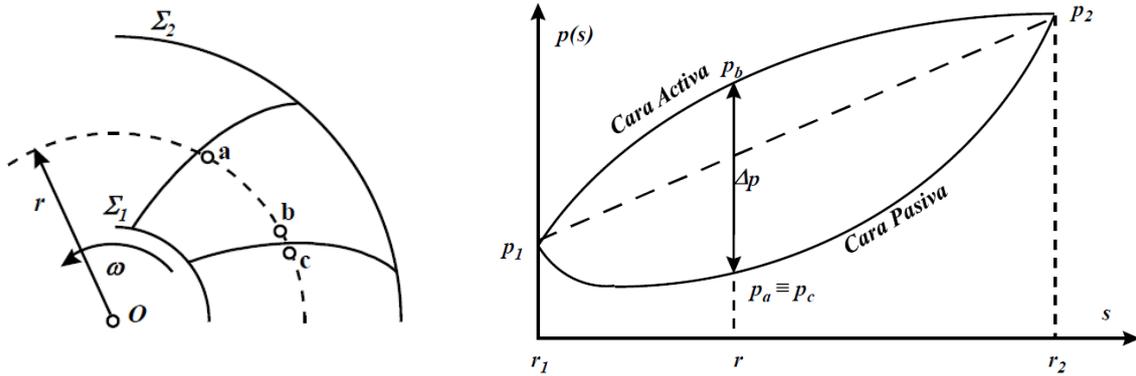


Figura 11-20. Distribución de presión a lo largo de las dos caras del álabe (Fuente: "G. López Patiño, F.J. Martínez (1999). Máquinas Hidráulicas")

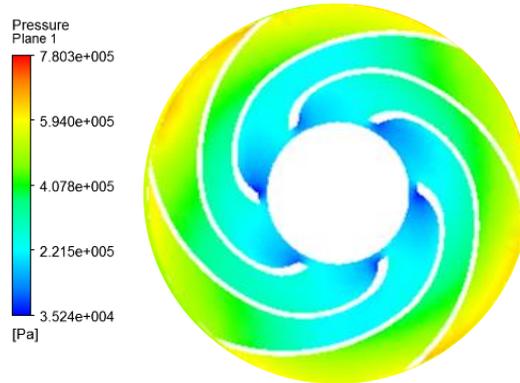


Figura 11-21. Evolución de la presión del fluido en el rodete

Por otro lado, es posible observar también una disminución de presión a la entrada del rodete, que produce que esta sea inferior a la atmosférica. Este fenómeno es debido a que en la aspiración del fluido, la energía de la que se dispone a la entrada (presión atmosférica) se debe emplear en parte para vencer las pérdidas por rozamiento producidas en la aspiración. La diferencia entre esta presión a la entrada y la tensión de vapor (T_v), será la que se utilice para acelerar el fluido hasta conseguir el punto de mínima presión en el rodete. La tensión de vapor (T_v) a una determinada temperatura, es la presión límite en la que un fluido se mantiene en estado líquido. Por debajo de esta presión, el fluido pasaría a estado gaseoso, provocando en el rodete el fenómeno de la cavitación. Dicha tensión de vapor a una temperatura ambiente de 25° es de 3166 Pa.

12. CONCLUSIONES

En este Trabajo Fin de Máster se han desarrollado una serie de técnicas para el modelado, simulación y análisis por ordenador de una bomba centrífuga. Mostrando a su vez un resumen teórico del desarrollo matemático en el que se basan, así como las partes más importantes de las que se componen este tipo de máquinas.

Por una parte, se ha explicado el completo desarrollo de modelado de elementos complejos como pueden ser la voluta o el rodete de una bomba, viendo operaciones básicas en la generación de sólidos.

Se implementa una técnica especialmente útil para la generación de familias de componentes, como es la parametrización. Con ella, se ha visto cómo proceder a la hora de realizar este tipo de trabajos, donde es fundamental un buen conocimiento del producto y las relaciones que lo definen.

Se hace el ensamblaje del modelo y su simulación para comprobar el correcto funcionamiento del conjunto montado. Además, se obtienen las cargas tensionales de los elementos más críticos mecánicamente. Con ello, se propone una mejora en el diseño del eje, radiando un cambio de sección para obtener un funcionamiento más seguro.

También se analiza el comportamiento del fluido dentro del rodete, ofreciendo una visión de la presión que sufre y las velocidades que alcanza.

Con todo ello, se ha podido demostrar, que las técnicas CAD son de gran utilidad en el diseño y análisis de nuevos productos, pudiendo evitar elevados costes de prototipado, así como tiempo de trabajo, dos de los factores más importantes en la industria.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

LIBROS Y APUNTES

- [1] Karassik, Igor J. (1985). *Bombas centrífugas: selección, operación y mantenimiento*. [Fecha de consulta: 23 de marzo de 2016],
- [2] Carnicer Royo E. (1996). *Bombas centrífugas*. [Fecha de consulta: 23 de marzo de 2016].
- [3] Mataix C. (1975). *Turbomáquinas hidráulicas: Turbinas hidráulicas, bombas, ventiladores*. [Fecha de consulta: 24 de marzo 2016]
- [4] Younis W. (2012). *Inventor y su simulación con ejemplos prácticos*. [Fecha de consulta: 3 de abril de 2015].
- [5] G. López Patiño, F.J. Martínez (1999). *Máquinas Hidráulicas*. [Fecha de consulta: 8 de mayo de 2016].
- [6] *Apuntes de Aplicaciones Industriales del Modelado de Sólidos*. [Fecha de consulta: 11 de mayo de 2015].
- [7] *Apuntes de Máquinas Hidráulicas*. [Fecha de consulta: 13 de mayo de 2015].
- [8] *Apuntes de Resistencia y Elasticidad de Materiales*. [Fecha de consulta: 15 de mayo de 2015].
- [9] *Apuntes de Tecnología de Máquinas*. [Fecha de consulta: 22 de mayo de 2015].
- [10] *Apuntes de Ingeniería Gráfica* [Fecha de consulta: 3 de junio de 2015].
- [11] *Apuntes de Proyectos*. [Fecha de consulta: 12 de noviembre de 2015].

URLs

- [1] Instrucciones de instalación, uso y mantenimiento para una bomba Kirloskar Tipo DB (2016). Disponible en <http://www.kirloskarpumps.com/download/IOM/db.pdf>
- [2] Ficha técnica de las bombas Kirloskar Tipo DB (2016). Disponible en http://www.kirloskarpumps.com/download/prod_catalogue/04%20DB.pdf
- [3] Tutorial ANSYS CFX - Pre User's Guide (2013). Disponible en <http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20CFX-Pre%20Users%20Guide.pdf>
- [4] Tutorial ANSYS CFX - Solver Modeling Guide (2013). Disponible en <http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20CFX-Solver%20Modeling%20Guide.pdf>
- [5] Tutorial ANSYS CFX - Post User's Guide (2013). Disponible en <http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20CFD-Post%20Users%20Guide.pdf>

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2-1. Rueda hidráulica (Fuente: "www.cd3wd.com").....	4
Figura 2-2. Bomba de embolo (Fuente: "https://fr.wikibooks.org/wiki/Pompes")	5
Figura 2-3. Bomba de engranajes (Fuente: "http://industrial-automatica.blogspot.com").....	5
Figura 2-4. Clasificación según dirección de flujo (Fuente: http://ocwus.us.es)	6

CAPÍTULO 3

Figura 3-1. Triángulos de velocidad a la entrada y salida del álabe	7
Figura 3-2. Descomposición de la velocidad absoluta.....	8
Figura 3-3. Pérdidas de flujo (Fuente: http://www.editores-srl.com.ar)	9
Figura 3-4. Gráfica Q-H de las pérdidas en la bomba. (Fuente: "G. López Patiño, F.J. Martínez (1999). Máquinas Hidráulicas").....	10

CAPÍTULO 4

Figura 4-1. Carcasa de bomba centrífuga (Fuente: "www.directindustry.it")	11
Figura 4-2. Clasificación de los rodets (Fuente: http://ingemecanica.com/).....	12
Figura 4-3. Morfologías de los anillos de desgaste (Fuente: "G. López Patiño, F.J. Martínez (1999). Máquinas Hidráulicas").....	13
Figura 4-4. Esquema de cierre hidráulico (Fuente: https://areamecanica.files.wordpress.com)	14
Figura 4-5. Anillos linterna (Fuente: http://slurrypumpmexico.com/).....	14

CAPÍTULO 5

Figura 5-1. Bomba comercial Kirloskar Modelo-DB (Fuente: http://www.kirloskarpumps.com)	15
Figura 5-2. Curvas Q-H para el modelo DB a 2900 rpm, obtenidas del catálogo Kirloskar-DB (Fuente: http://www.kirloskarpumps.com).....	16

CAPÍTULO 6

Figura 6-1. Esquema de la bomba con las medidas de los parámetros principales, catálogo Kirloskar-DB (Fuente: http://www.kirloskarpumps.com).....	17
Figura 6-2. Vista seccionada de la bomba, catálogo Kirloskar-DB (Fuente: http://www.kirloskarpumps.com)	18
Figura 6-3. Generación de espiral.....	19
Figura 6-4. Generación de una solevación	19
Figura 6-5. Creación del spline de interpolación	20
Figura 6-6. Generación de nuevo sólido	20
Figura 6-7. Voluta de la bomba centrífuga	21
Figura 6-8. Generación de parte del embridado de entrada.....	21
Figura 6-9. Creación de agujero en el embridado de salida.....	22
Figura 6-10. Simetría polar para la creación de un patrón circular	23
Figura 6-11. Modelo acabado de la carcasa	23
Figura 6-12. Revolución del tocho macizo en la carcasa trasero	24
Figura 6-13. Vaciado de la caja de rodamientos.....	24
Figura 6-14. Generación del nervio inferior.....	25

<i>Figura 6-15. Modelo acabado de la caja de rodamientos.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 6-16. Pasos en el modelado del rodete</i>	<i>26</i>
<i>Figura 6-17. Modelo final del rodete.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 6-18. Diferentes secciones del eje</i>	<i>28</i>
<i>Figura 6-19. Modelo final del eje.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 6-20. Tapa de rodamientos</i>	<i>29</i>
<i>Figura 6-21. Modelo finalizado de la brida intermedia.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 6-22. Componentes adicionales</i>	<i>30</i>
<i>Figura 6-23. Elementos normalizados.....</i>	<i>31</i>

CAPÍTULO 7

<i>Figura 7-1. Diagrama de flujo en parametrización de modelos.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 7-2. Esquema de la bomba con los parámetros motores.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 7-3. Tabla dimensional de los diferentes modelos</i>	<i>34</i>
<i>Figura 7-4. Tabla de parámetros con dimensiones límite</i>	<i>34</i>
<i>Figura 7-5. Generación de parámetros en Inventor</i>	<i>35</i>
<i>Figura 7-6. Descomposición de características y operaciones de modelado en la carcasa</i>	<i>36</i>
<i>Figura 7-7. Expresión de cotas parametrizadas</i>	<i>37</i>
<i>Figura 7-8. Relación de cotas con parámetros.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 7-9. Vinculación de la tabla de diseño y Actualización del modelo.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 7-10. Generación de diferentes modelos de la bomba Kirloskar DB.....</i>	<i>39</i>

CAPÍTULO 8

<i>Figura 8-1. Restricción insertar utilizada entre la caja de rodamientos y la tapa.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 8-2. Ejemplo de la restricción de coincidencia utilizada durante el ensamblaje.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 8-3. Inserción de tornillos en el montaje de la tapa de rodamientos.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 8-4. Montaje de rodamientos y eje</i>	<i>43</i>
<i>Figura 8-5. Detalle del cierre hidráulico de la bomba centrífuga.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 8-6. Montaje de la chaveta en el chavetero con las diferentes restricciones</i>	<i>44</i>
<i>Figura 8-7. Vista explotada de parte de la bomba.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 8-8. Montaje final de la bomba centrífuga</i>	<i>45</i>

CAPÍTULO 9

<i>Figura 9-1. Opción “Unión” y “Restringir” en Inventor.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 9-2. Vista seccionada con uniones de rotación</i>	<i>47</i>
<i>Figura 9-3. Configuración de la simulación dinámica</i>	<i>48</i>
<i>Figura 9-4. Árbol de la simulación dinámica</i>	<i>49</i>
<i>Figura 9-5. Localización del par torsor generado por el motor eléctrico</i>	<i>53</i>
<i>Figura 9-6. Magnitud del par torsor y su condición de aplicación</i>	<i>53</i>
<i>Figura 9-7. Condición de aplicación del par resistente.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 9-8. Condiciones resistivas en la unión de revolución</i>	<i>55</i>
<i>Figura 9-9. Condiciones visuales de la simulación.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 9-10. Gráfica de resultados de la simulación dinámica</i>	<i>56</i>

CAPÍTULO 10

<i>Figura 10-1. Configuración de malla genérica</i>	57
<i>Figura 10-2. Eje con mallado genérico</i>	57
<i>Figura 10-3. Refinado de malla en la reducción de sección (0,2 mm) y la zona del chavetero (2 mm)</i> 58	
<i>Figura 10-4. Vista del árbol de las simulaciones del eje en ambos materiales</i>	58
<i>Figura 10-5. Comparativa de las propiedades de los materiales utilizados en la simulación</i>	59
<i>Figura 10-6. Resultado del análisis de tensión</i>	59
<i>Figura 10-7. Resultado del análisis de tensión en Acero al carbono: 125,4 MPa</i>	60
<i>Figura 10-8. Resultado del análisis de tensión en Acero inoxidable: 124,8 MPa</i>	60
<i>Figura 10-9. Componente con concentrador de tensiones (a) y distribución de tensiones para diferentes casos: deformación elástica (b), fluencia local para un material dúctil (c), fluencia general para un material dúctil (d) y fractura de material frágil (e). Fuente: (“Apuntes Tecnología de Máquinas”)</i>	61
<i>Figura 10-10. Vista del radio de acuerdo en el cambio de secciones propuesto</i>	61
<i>Figura 10-11. Resultado del análisis de tensión tras modificación en Acero al carbono: 104,7 MPa</i> ...	62
<i>Figura 10-12. Resultado del análisis de tensión tras modificación en Acero al carbono: 103,9 MPa</i> ...	62

CAPÍTULO 11

<i>Figura 11-1. Discretización de una sección hemisférica en elementos triangulares</i>	63
<i>Figura 11-2. Rodete donde se aplican las condiciones de iniciales</i>	64
<i>Figura 11-3. Proceso de modelado del fluido</i>	65
<i>Figura 11-4. Etapas de la resolución del problema en Ansys</i>	65
<i>Figura 11-5. Geometría importada en Ansys</i>	66
<i>Figure 11-6. Named_ selección resaltadas</i>	67
<i>Figura 11-7. Mallado del modelo en Ansys</i>	68
<i>Figura 11-8. Diferentes dominios y sus opciones</i>	70
<i>Figura 11-9. Tipos de condiciones de contorno en un fluido</i>	71
<i>Figura 11-10. Condiciones de contorno para la entrada del fluido</i>	71
<i>Figura 11-11. Configuración básica de una condición de contorno</i>	72
<i>Figura 11-12. Configuración detallada de la condición de contorno de la entrada</i>	72
<i>Figura 11-13. Condiciones de contorno para el rodete</i>	73
<i>Figura 11-14. Condiciones de contorno para la carcasa</i>	74
<i>Figura 11-15. Definición del tipo de resolución utilizada</i>	75
<i>Figura 11-16. Extracto del estado de la simulación</i>	76
<i>Figura 11-17. Evolución de la presión del fluido a lo largo del rodete y la voluta</i>	77
<i>Figura 11-18. Evolución de la velocidad del fluido a lo largo del rodete y la voluta (corte transversal)</i> 77	
<i>Figura 11-19. Vista 3D de la evolución del fluido en presiones (izquierda) y en velocidades (derecha)</i> 78	
<i>Figura 11-20. Distribución de presión a lo largo de las dos caras del álabe (Fuente: “G. López Patiño, F.J. Martínez (1999). Máquinas Hidráulicas”)</i>	79
<i>Figura 11-21. Evolución de la presión del fluido en el rodete</i>	79

TRABAJO FIN DE MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

PRESUPUESTO

**DISEÑO DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA MEDIANTE LA GENERACIÓN DE SU
PROTOTIPO VIRTUAL. SIMULACIÓN DINÁMICA, FEM, CRACIÓN DE SU FAMILIA
DE PIEZAS Y SIMULACIÓN DEL FLUIDO.**

Sergio Garrido Martínez

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1.	DESCRIPCIÓN DE LAS UNIDADES DE TRABAJO	2
2.	CUADRO DE PRECIOS DESCOMPUESTOS	4
3.	RESUMEN POR CAPÍTULO.....	7
4.	PRESUPUESTO TOTAL.....	8

1. DESCRIPCIÓN DE LAS UNIDADES DE TRABAJO

El Trabajo Fin de Máster por número de créditos está diseñado para que tome una extensión aproximada de 300 horas. En este caso, dicha estimación se ha ajustado bastante bien. El presupuesto se ha dividido en dos capítulos, dentro de los cuales se han definido las unidades de trabajo. Por un lado, se ha agrupado todo lo relacionado con la realización del prototipo virtual y por otro lado, un capítulo dedicado a las amortizaciones del *hardware* y *software* utilizado, así como el material de reprografía.

El primer capítulo se ha dividido en las siguientes unidades de trabajo:

1. Análisis del caso y búsqueda de información, 15 horas. Durante esta fase del proyecto se ha recopilado la información necesaria sobre máquinas hidráulicas mediante la consulta de bibliografía. Además, se ha intentado conseguir una bomba comercial que facilitara el mayor número de información con respecto a las características de la máquina ofertada. El precio unitario elegido para este punto es de 25 €/h ya que se realizan tareas de búsqueda de información las cuales no requieren de una capacitación técnica muy elevada.
2. Prototipado virtual del modelo, 170 horas. Esta parte es la que incluye el grueso del proyecto. En ella se ha englobado todo lo relacionado al trabajo con Inventor como es la toma de dimensiones de la bomba, su modelado, ensamblaje, simulación dinámica y análisis tensorial del eje. Para esta parte del trabajo, se requiere de una formación técnica así como del conocimiento de programas de modelado CAD y FEM. Por ello, se ha optado por una tarifa horaria superior, ascendiendo a los 35 €/hora. Además, se ha tenido en cuenta el trabajo dedicado por la tutora del TFM en la revisión y guiado del alumno, tasándola en este caso de 55 €/hora.
3. Parametrización de la carcasa, 15 horas. En esta etapa del proyecto se realiza el modelado de la voluta en función de diferentes parámetros para variar las dimensiones de la bomba. De nuevo el precio es de 35 €/horas ya que se requiere de conocimiento avanzado en modelado CAD.
4. Realización de planos, 15 horas. Esta fase del proyecto consiste en la creación de los planos de todos los componentes del sistema así como del conjunto. En principio, la creación de planos no requiere de un gran conocimiento, pero en este caso, la máquina hidráulica consta de partes con una forma compleja que no son intuitivas. Así, se requiere un amplio conocimiento de la norma de acotación y vistas para conseguir unos planos correctos. Las tarifas horarias utilizadas corresponden de nuevo a 35 €/horas para el graduado en Tecnologías Industriales y 55 €/hora para la ingeniera sénior que supervisa este TFM.
5. Análisis del fluido en Ansys, 20 horas. En este apartado el alumno pretende dar más valor al trabajo mediante un análisis de la velocidad y la presión del fluido en la bomba centrífuga. Para ello, se ha requerido de un autoaprendizaje inicial de la aplicación, ascendiendo al número de horas requeridas a 20, cuando un profesional experimentado en este *software*

podría hacer el mismo trabajo en mucho menos tiempo. De nuevo se tasa el precio unitario en 35 €/hora.

6. Desarrollo de la memoria, 65 horas. Con este apartado se cierra el TFM completando así las 300 horas requeridas. El precio en este caso baja a 25 €/hora ya que solo es necesario plasmar en papel lo realizado en los diferentes software.

El segundo capítulo se divide en dos unidades de trabajo:

1. Amortización de las herramientas: En este apartado, se incluyen las amortizaciones de los diferentes equipos y *software* utilizados durante la ejecución del Trabajo Fin de Máster. Este incluye:
 - a. Ordenador portátil utilizado para la creación del proyecto, al cual se le ha dado una vida útil de 3 años (5280 horas) y que en su momento costó 559€.
 - b. Licencia Autodesk Inventor, con un precio de 6727,6 € y una amortización de tres años (5280 horas).
 - c. Licencia AutoCad, con un precio de 4583,7 € y una amortización de nuevo de tres años (5280 horas)
 - d. Licencia Ansys 15.0, la cual tiene un precio para un año de 36390€.
 - e. Licencia Microsoft Office 2010, con coste de 120€ y se espera amortizar en un año.
2. Material de reprografía: Utilizado para la impresión y encuadernación del proyecto, la cifra asciende a 100€

2. CUADRO DE PRECIOS DESCOMPUESTOS

Código	Ud.	Descripción	Medición	Precio	Importe
1	CAP.1	Ejecución del Trabajo Fin de Máster			
1.1	Ud	Análisis del caso y búsqueda de información			
		Estudio de bombas centrífugas incluyendo contexto, investigación y búsqueda de información de diferentes bombas comerciales			
	h	Graduado en Tecnolog. Industriales	15	25	375
	%	Costes directos complementarios	0,03	375	11,25
			Coste total		386,25 €
1.2	Ud	Prototipado virtual del modelo			
		Modelado de los componentes del sistema acorde a las medidas comerciales, ensamble de todas las partes, simulación dinámica y análisis de la bomba			
	h	Ingeniero sénior de UPV	9	55	495
	h	Graduado en Tecnolog. Industriales	170	35	5950
	%	Costes directos complementarios	0,03	6445	193,35
			Coste total		6638,35 €
1.3	Ud	Parametrización de la carcasa			
		Desarrollo de una voluta parametrizada para facilitar el futuro modelado de otros tipos de carcasa			
	h	Graduado en Tecnolog. Industriales	15	35	525
	%	Costes directos complementarios	0,03	525	15,75
			Coste total		540,75 €

1.4	Ud Realización de planos			
	Generación de todos los planos de la bomba centrífuga, incluyendo planos de las partes y de conjunto			
	h Ingeniero senior de UPV	3	55	165
	h Graduado en Tecnolog. Industriales	15	35	525
	% Costes directos complementarios	0,03	690	20,7
		Coste total		710,7 €
1.5	Ud Análisis del fluido en Ansys			
	Modelado del fluido y su análisis en presiones y velocidades			
	h Graduado en Tecnolog. Industriales	20	35	700
	% Costes directos complementarios	0,03	700	21
		Coste total		721 €
1.6	Ud Desarrollo de la memoria			
	Redacción y revisión de la memoria del proyecto incluyendo presupuesto y pliego de condiciones			
	h Graduado en Tecnolog. Industriales	65	25	1625
	% Costes directos complementarios	0,03	1625	48,75
		Coste total		1673,75 €

Código	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe
2	CAP.2	Instrumentos y materiales de trabajo			
2.1	Ud	Amortización de las herramientas			
		Amortización tanto de software como hardware utilizado para la realización de Trabajo Fin de Máster			
	h	Ordenador Toshiba Satellite C50	300	0,11	31,76
	h	Licencia Autodesk Inventor 2014	200	1.21	254,83
	h	Licencia AutoCad 2014	10	0.87	8,68
	h	Licencia Ansys 15.0	20	20,68	413,52
	h	Licencia Microsoft Office 2013	65	0,07	4,43
			Coste total		713,23 €
2.2	Ud	Material de reprografía			
		Se considera material de reprografía a la impresión en papel y encuadernación del TFM.			
	Ud	Impresión y encuadernación	1	100	100
			Coste total		100 €

3. RESUMEN POR CAPÍTULOS

MEDICIONES Y PRESUPUESTO

Nº Orden	Ud	Descripción UO	Medición	Precio	Importe
1 Ejecución del Trabajo Fin de Máster					
1.1	Ud	Análisis del caso y búsqueda de información	1	386,25	386,25
1.2	Ud	Prototipado virtual del modelo	1	6638,4	6638,4
1.3	Ud	Parametrización de la carcasa	1	540,75	540,75
1.4	Ud	Realización de planos	1	710,70	710,7
1.5	Ud	Análisis del fluido en Ansys	1	721	721
1.6	Ud	Desarrollo de la memoria	1	1673,8	1673,8
Total Capítulo 1					10671 €
2 Instrumentos y materiales de trabajo					
2.1	Ud	Amortización de las herramientas	1	713.83	713.83
2.2	Ud	Material de reprografía	1	100	100
Total Capítulo 2					813.83 €

4. PRESUPUESTO TOTAL

PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL

CAP 1	Ejecución del Trabajo Fin de Máster	10.671 €
CAP 2	Instrumentos y materiales de trabajo	813,83 €
TOTAL EJECUCIÓN MATERIAL.....		11.484,83 €
13 % GASTOS GENERALES.....		1.493,02 €
6 % BENEFICIO INDUSTRIAL.....		689,209 €
TOTAL EJECUCIÓN POR CONTRATA.....		13.666,95 €
21 % IVA.....		2.870,06 €
PRESUPUESTO TOTAL (BASE DE LICITACIÓN).....		16.537,01 €

Asciende el presupuesto proyectado, a la expresada cantidad de

DIECISÉIS MIL QUINIENTOS TREINTA Y SIETE EUROS CON UN CÉNTIMO.

13 de Noviembre de 2016

TRABAJO FIN DE MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ANEXOS

DISEÑO DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA MEDIANTE LA GENERACIÓN DE SU PROTOTIPO VIRTUAL. SIMULACIÓN DINÁMICA, FEM, CRACIÓN DE SU FAMILIA DE PIEZAS Y SIMULACIÓN DEL FLUIDO.

Sergio Garrido Martínez

ÍNDICE DE ANEXOS

Índice de Anexos

1.	ABREVIATURAS, SIMBOLOGÍA Y VARIABLES	2
2.	PLANOS.....	4
2.1	Plano de conjunto	5
2.2	Voluta	6
2.3	Eje	7
2.4	Rodete	8
2.5	Brida intermedia.....	9
2.6	Anillo de desgaste y Estopa.....	10
2.7	Anillo linterna	11
2.8	Casquillo para eje	12
2.9	Prensaestopas	13
2.10	Caja de rodamientos.....	14
2.11	Tapa de rodamientos.....	15
2.12	Pie	16

1. ABREVIATURAS, SIMBOLOGÍA Y VARIABLES

TFM: Trabajo Fin de Máster.

MT: Master Thesis.

UPV: Universidad Politécnica de Valencia.

CAD: Computer Aided Design.

FEM: Finite Element Method.

CFD: Computational Fluid Dynamics.

Rpm: Revoluciones Por Minuto.

N: Velocidad angular expresada en revoluciones por minuto.

z: Número de álabes en el rodete.

Q₀: Caudal nominal de la bomba centrífuga.

Q_r: Caudal a través del rodete.

H_{t,∞}: Altura teórica para un número infinito de álabes.

H_{t,z}: Altura teórica para un número determinado de álabes.

H_u: Altura útil de la bomba centrífuga.

Pot_{int}: Potencia interna.

Pot_{abs}: Potencia absorbida.

M: Par de torsión.

μ: Coeficiente de Pfleiderer.

b₁: Anchura del rodete a la entrada de la bomba centrífuga.

b₂: Anchura del rodete a la salida de la bomba centrífuga.

D₁: Diámetro del rodete a la entrada de la bomba centrífuga.

D₂: Diámetro del rodete a la salida de la bomba centrífuga.

β₁: Ángulo del álabe a la entrada del rodete.

β₂: Ángulo del álabe a la salida del rodete.

α₁: Ángulo de entrada del fluido.

η_v : Rendimiento volumétrico.

η_h : Rendimiento hidráulico.

η_{mec} : Rendimiento mecánico.

η_g : Rendimiento global.

ψ_2 : Coeficiente de paso por la sección de salida del rodete.

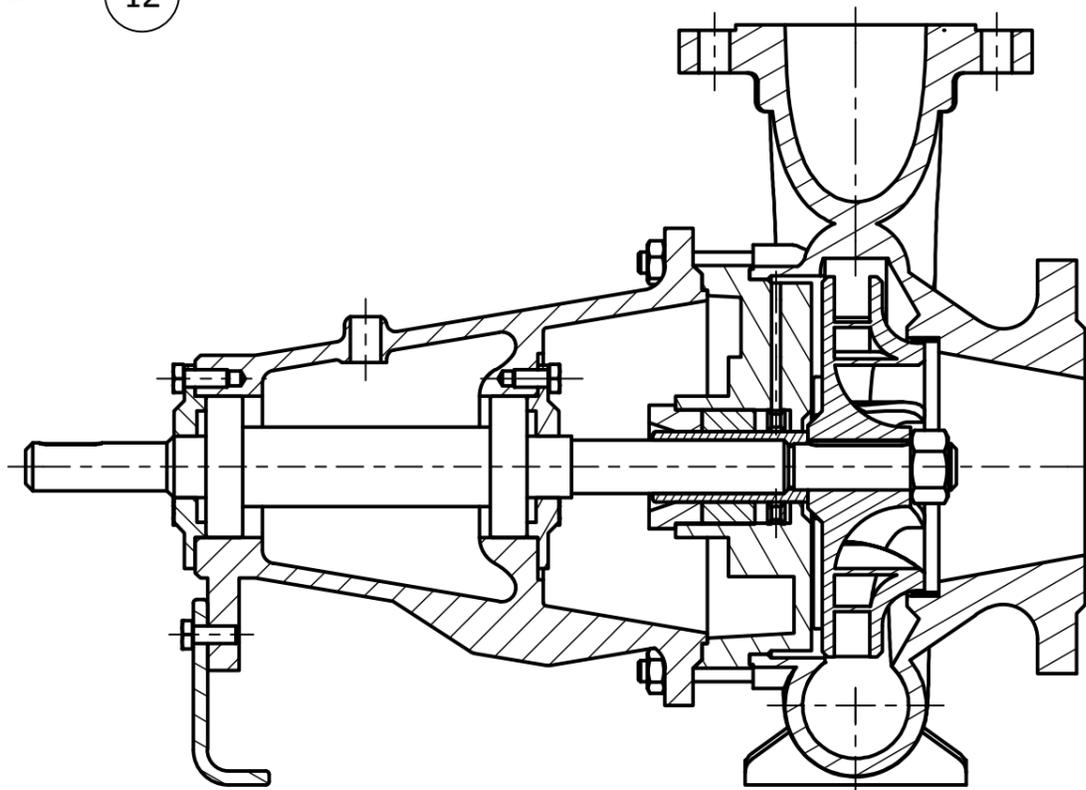
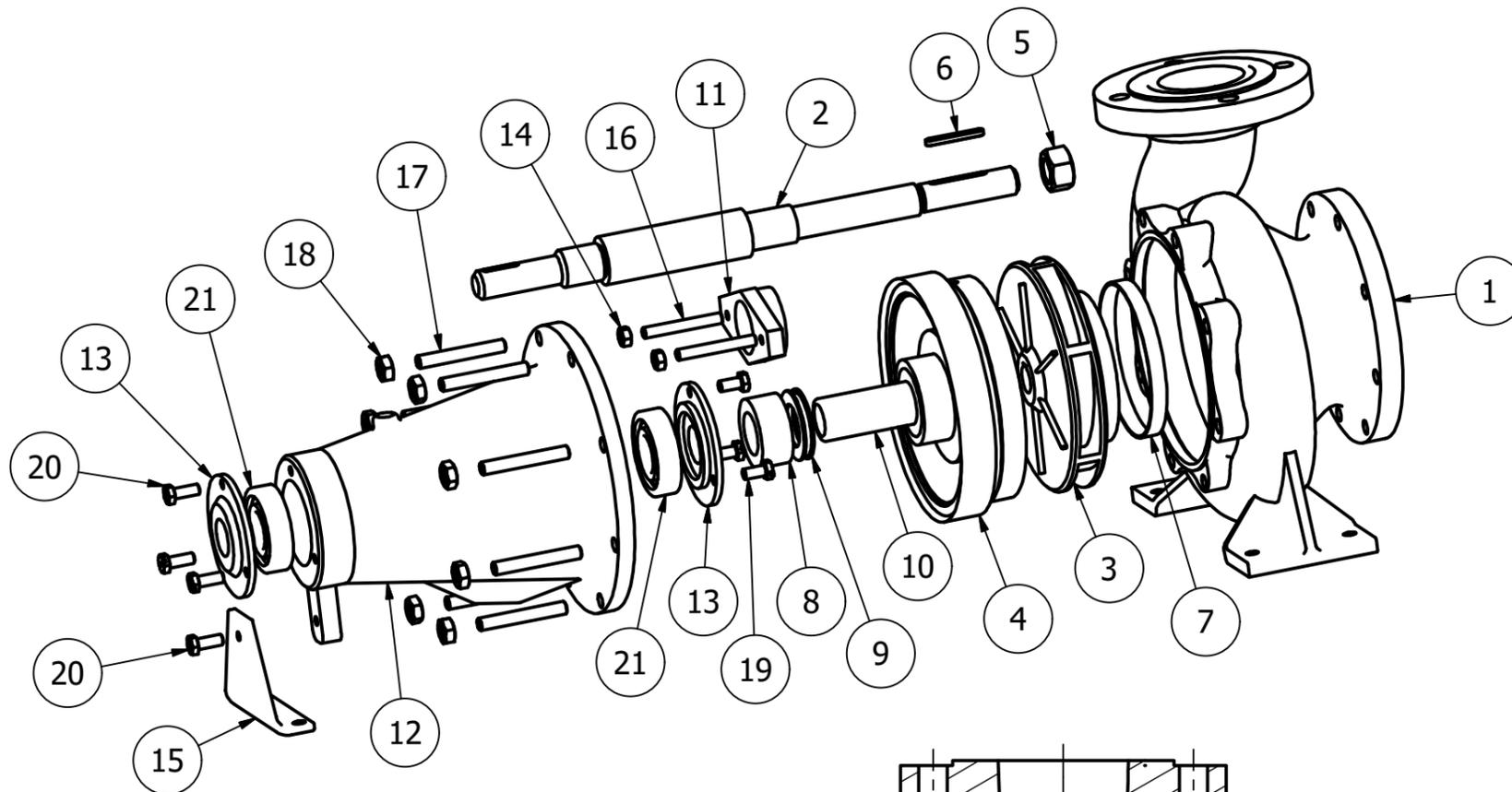
ρ : Densidad.

2. PLANOS

- 2.1. Plano de conjunto**
- 2.2. Voluta**
- 2.3. Eje**
- 2.4. Rodete**
- 2.5. Brida intermedia**
- 2.6. Anillo de desgaste y Estopa**
- 2.7. Anillo linterna**
- 2.8. Casquillo para eje**
- 2.9. Prensaestopas**
- 2.10. Caja de rodamientos**
- 2.11. Tapa de rodamientos**
- 2.12. Pie**

LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Voluta	
2	1	Eje	
3	1	Rodete	
4	1	Brida interior	
5	1	ISO 7413 - M24	Tuerca hexagonal
6	1	ISO 2491 - A 8 x 5 x 56	Chaveta paralela delgada
7	1	Anillo de desgaste	
8	1	Estopa	
9	1	Anillo linterna	
10	1	Casquillo para eje	
11	1	Prensaestopas	
12	1	Caja de rodamientos	
13	2	Tapa de rodamientos	
14	2	ISO 4032 - M10	Tuercas hexagonales
15	1	Pie soporte	
16	2	DIN 835 - M10 x 60	Perno de doble final
17	8	DIN 835 - M12 x 65	Perno de doble final
18	8	DIN 6915 - M12	Tuerca hexagonal
19	3	Bolt GB 29.1 M10 x 20	Tuerca hexagonal
20	4	Bolt GB 29.1 M10 x 25	Tuerca hexagonal
21	2	DIN 625 SKF - SKF 6307	Rodamientos de bolas de una hilera



TRABAJO FIN DE MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL



ESCUOLA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS INDUSTRIALES VALENCIA

Autor: Sergio Garrido Martínez

Proyecto:

DISEÑO Y ANÁLISIS DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA

Fecha:

6/6/2016

Escala:

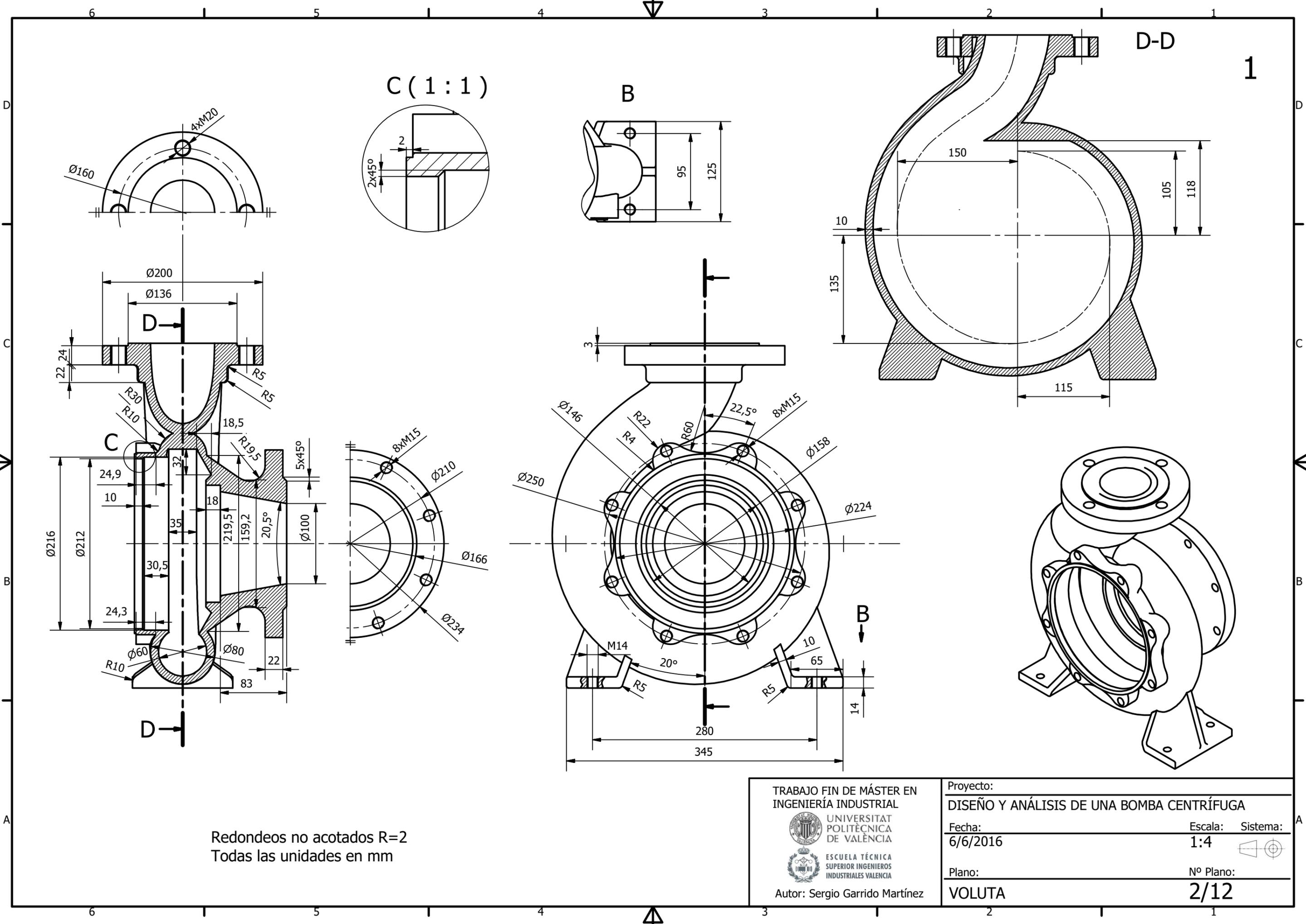
1:4

Plano:

PLANO DE CONJUNTO

Nº Plano:

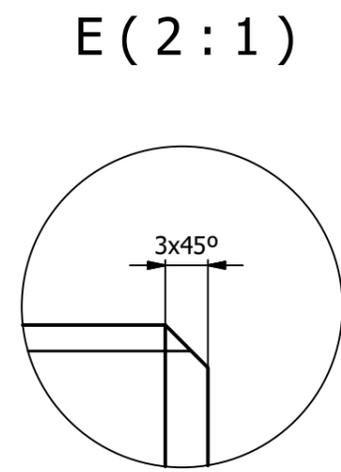
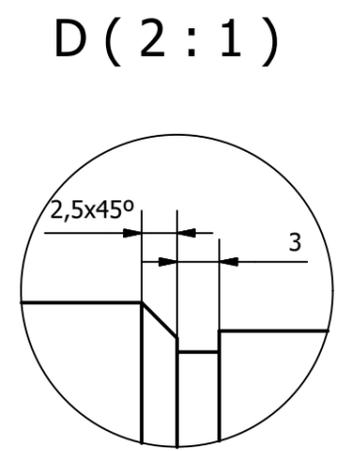
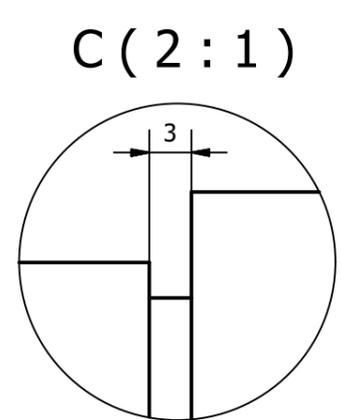
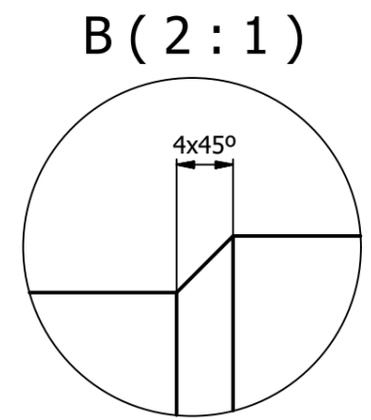
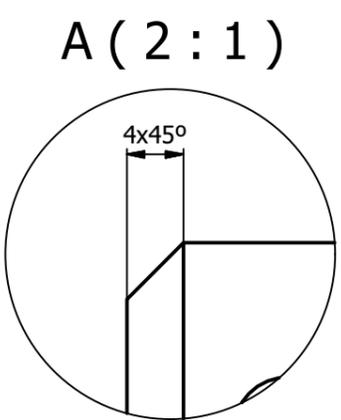
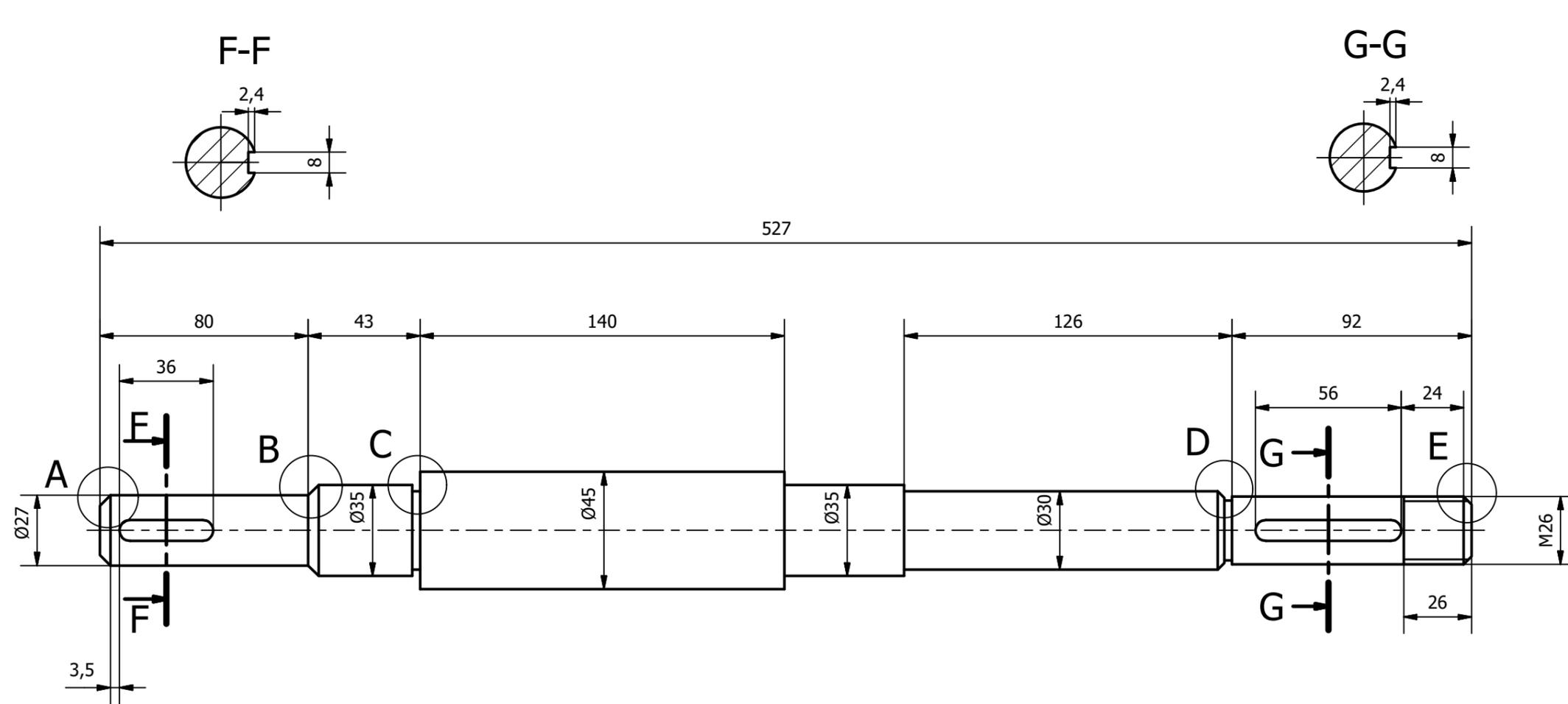
1/12



Redondeos no acotados R=2
 Todas las unidades en mm

TRABAJO FIN DE MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
 ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS INDUSTRIALES VALENCIA
 Autor: Sergio Garrido Martínez

Proyecto: DISEÑO Y ANÁLISIS DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA	
Fecha: 6/6/2016	Escala: Sistema: 1:4
Plano: VOLUTA	Nº Plano: 2/12

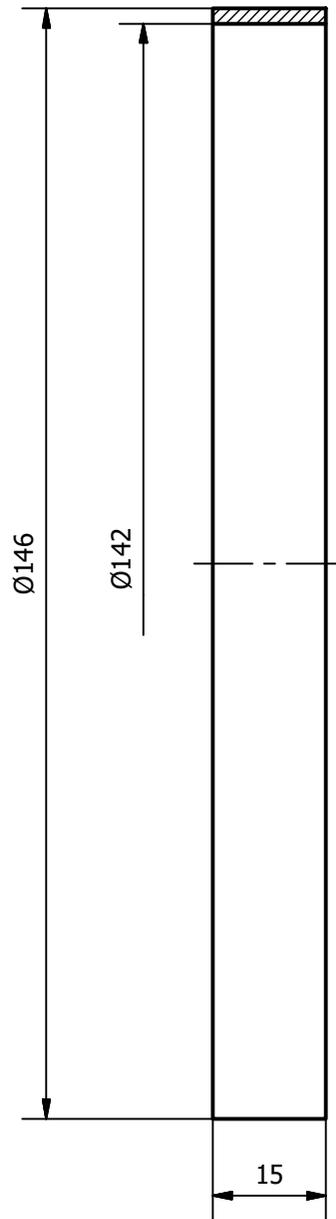


Todas la unidades en mm

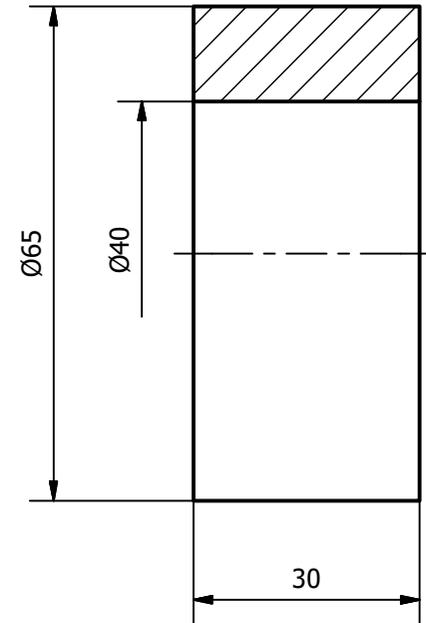
TRABAJO FIN DE MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
 ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS INDUSTRIALES VALENCIA
 Autor: Sergio Garrido Martínez

Proyecto:	DISEÑO Y ANÁLISIS DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA	
Fecha:	6/6/2016	Escala: Sistema:
		1:2
Plano:	EJE	Nº Plano:
		3/12

Todas las unidades en mm



7



8

TRABAJO FIN DE MÁSTER EN
INGENIERÍA INDUSTRIAL



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

Autor: Sergio Garrido Martínez

Proyecto:

DISEÑO Y ANÁLISIS DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA

Fecha:

6/6/2016

Escala: Sistema:

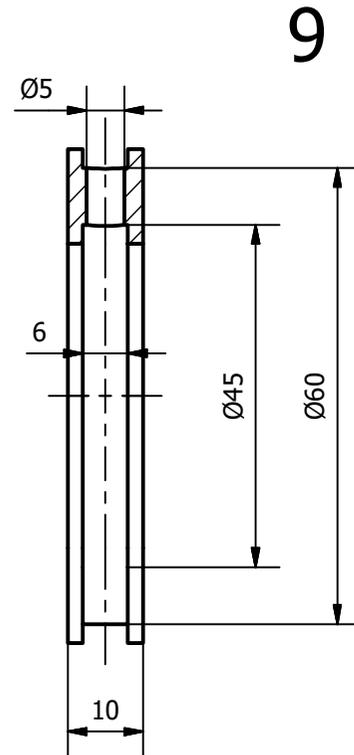
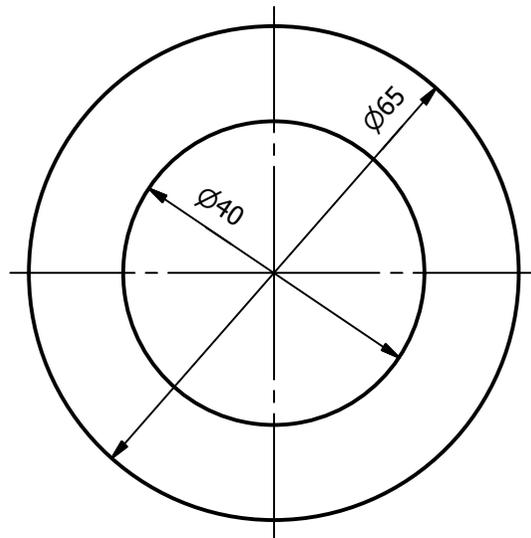
1:1



Plano:

Nº Plano:

ANILLO DE DESGASTE Y ESTOPA 6/12



Todas las unidades en mm

TRABAJO FIN DE MÁSTER EN
INGENIERÍA INDUSTRIAL



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

Autor: Sergio Garrido Martínez

Proyecto:

DISEÑO Y ANÁLISIS DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA

Fecha:

6/6/2016

Escala: Sistema:

1:1



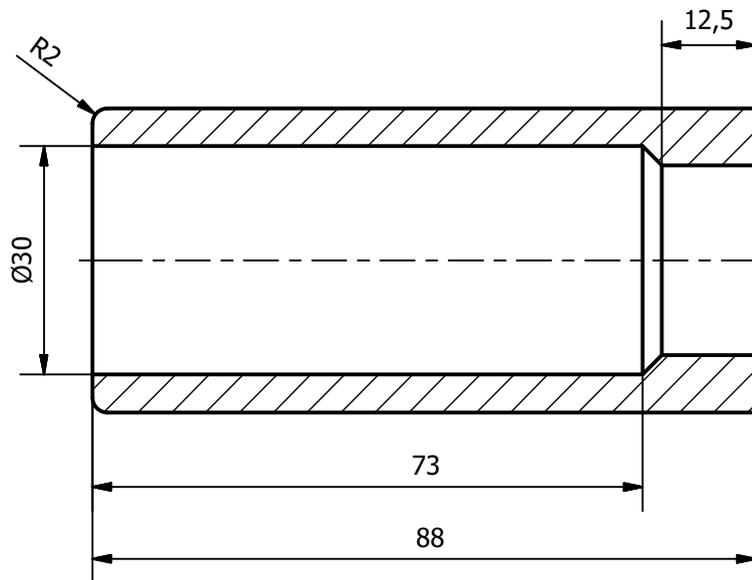
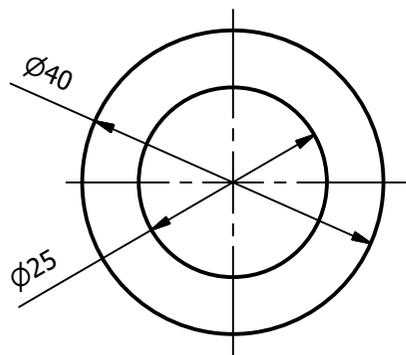
Plano:

ANILLO LINTERNA

Nº Plano:

7/12

10



Todas las unidades en mm

TRABAJO FIN DE MÁSTER EN
INGENIERÍA INDUSTRIAL



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

Autor: Sergio Garrido Martínez

Proyecto:

DISEÑO Y ANÁLISIS DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA

Fecha:

6/6/2016

Escala: Sistema:

1:1

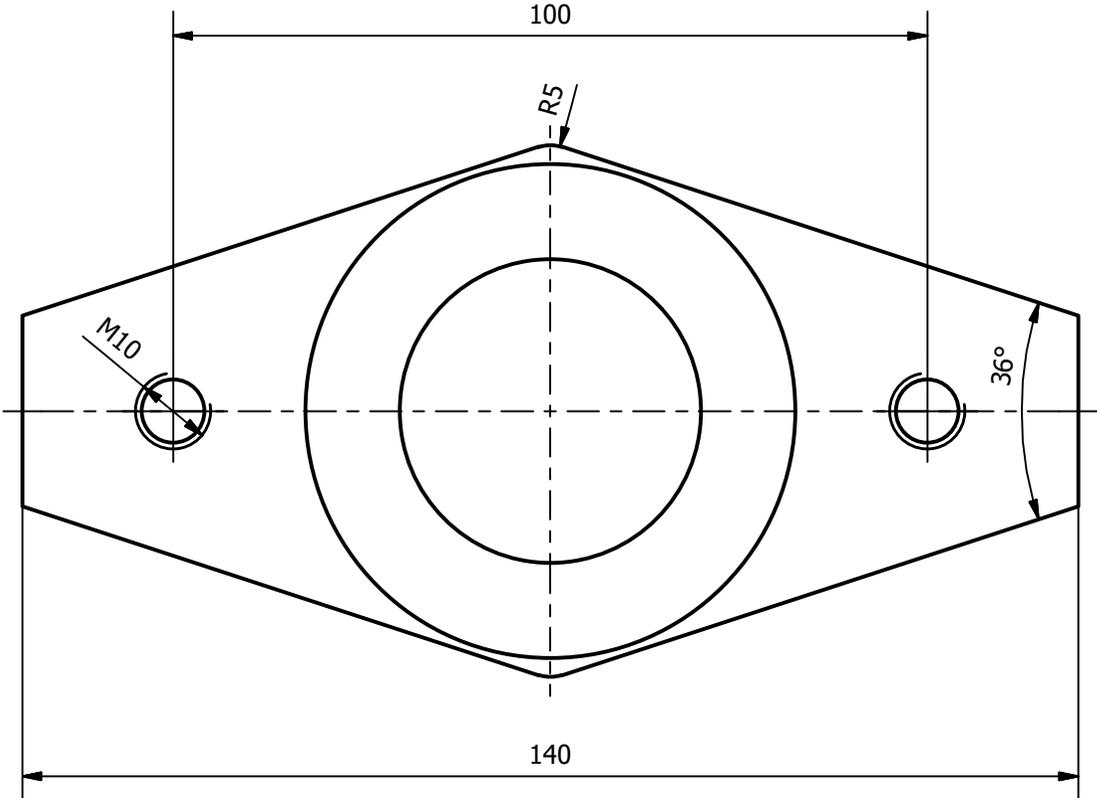
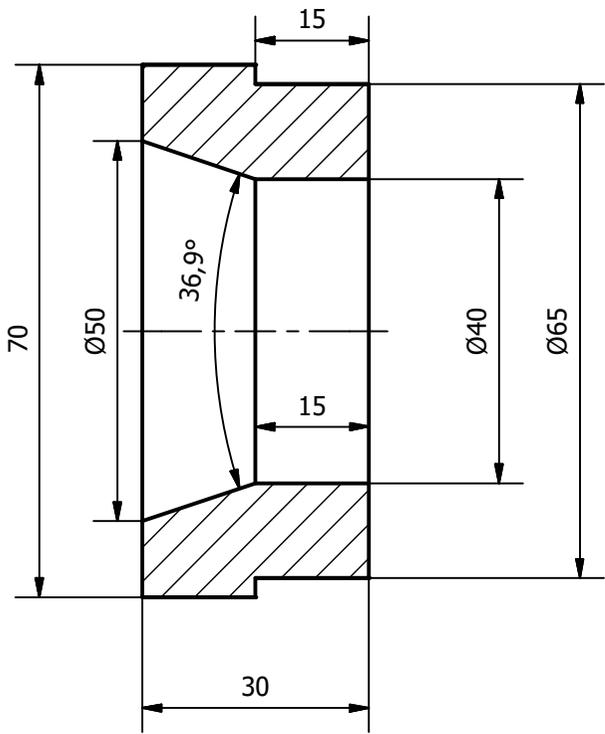


Plano:

CASQUILLO PARA EJE

Nº Plano:

8/12



Todas las unidades en mm

TRABAJO FIN DE MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS INDUSTRIALES VALENCIA

Autor: Sergio Garrido Martínez

Proyecto:

DISEÑO Y ANÁLISIS DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA

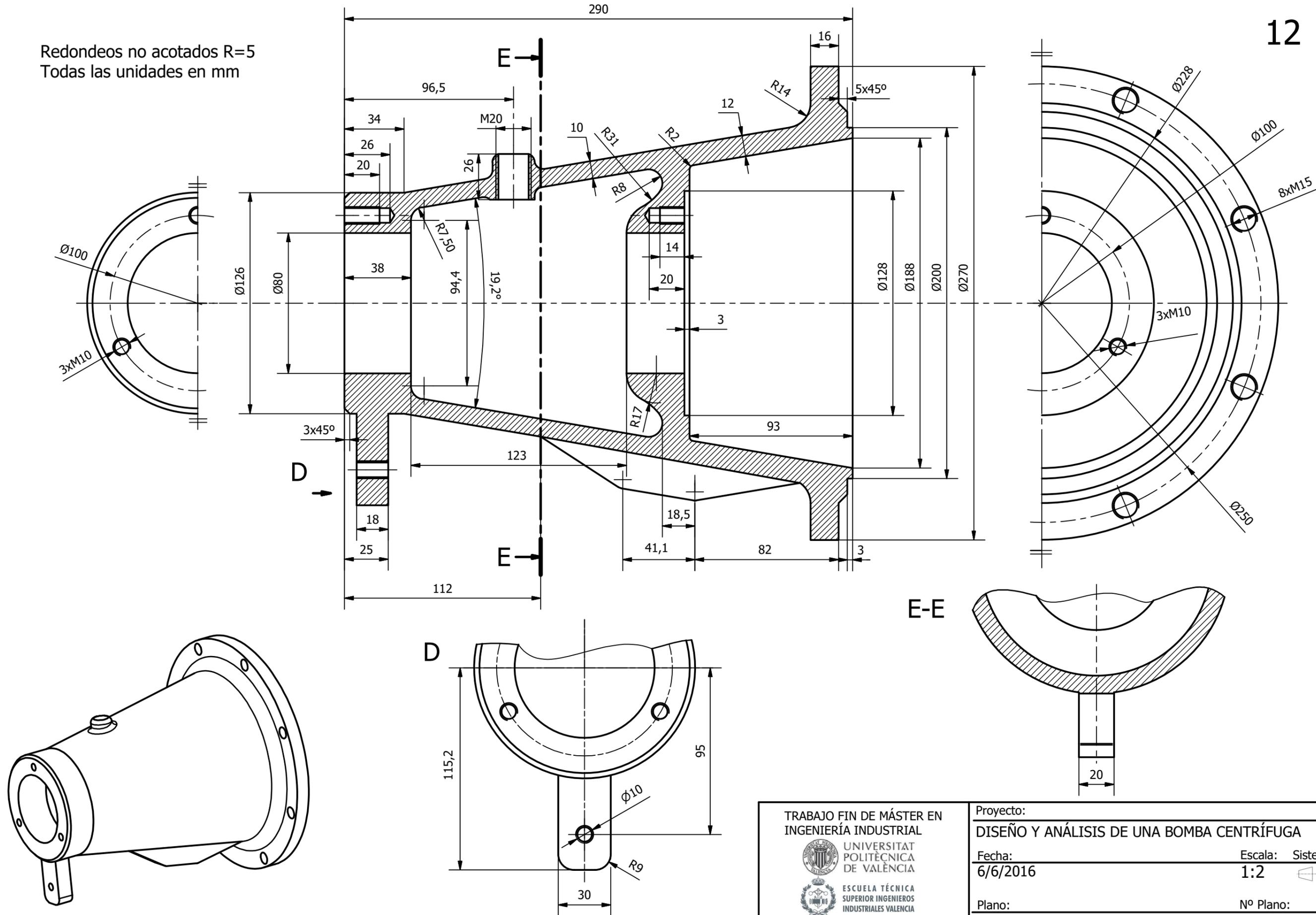
Fecha: Escala: Sistema:

6/6/2016 1:1

Plano: Nº Plano:

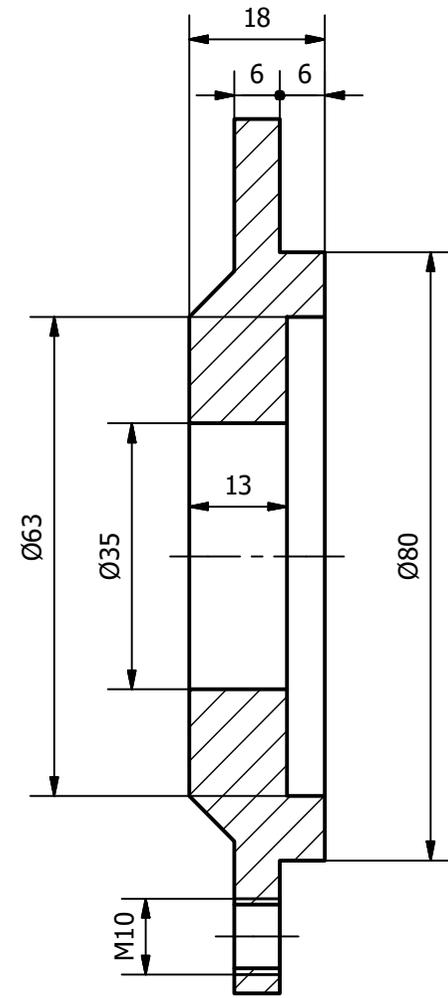
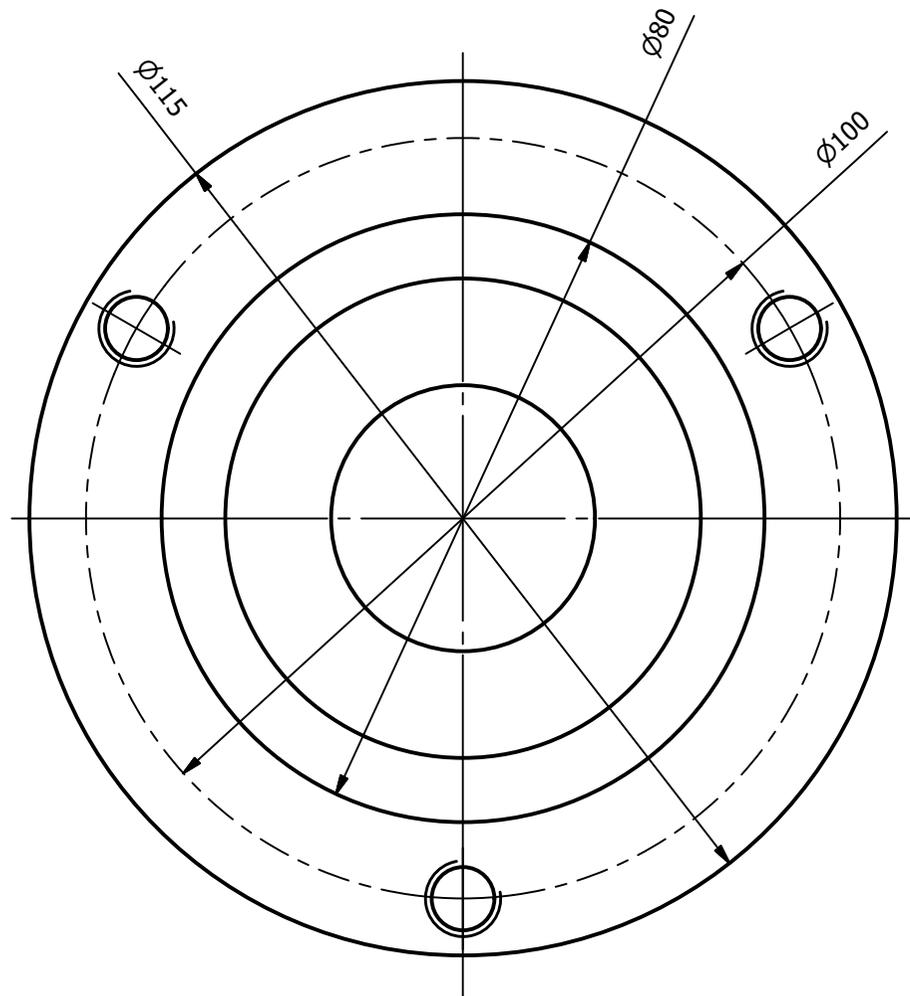
PRENSAESTOPAS 9/12

Redondeos no acotados R=5
Todas las unidades en mm



TRABAJO FIN DE MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
 ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS INDUSTRIALES VALENCIA
 Autor: Sergio Garrido Martínez

Proyecto:	
DISEÑO Y ANÁLISIS DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA	
Fecha:	Escala: Sistema:
6/6/2016	1:2
Plano:	Nº Plano:
CAJA DE RODAMIENTOS	10/12



13

Todas las unidades en mm

TRABAJO FIN DE MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS INDUSTRIALES VALENCIA

Autor: Sergio Garrido Martínez

Proyecto:

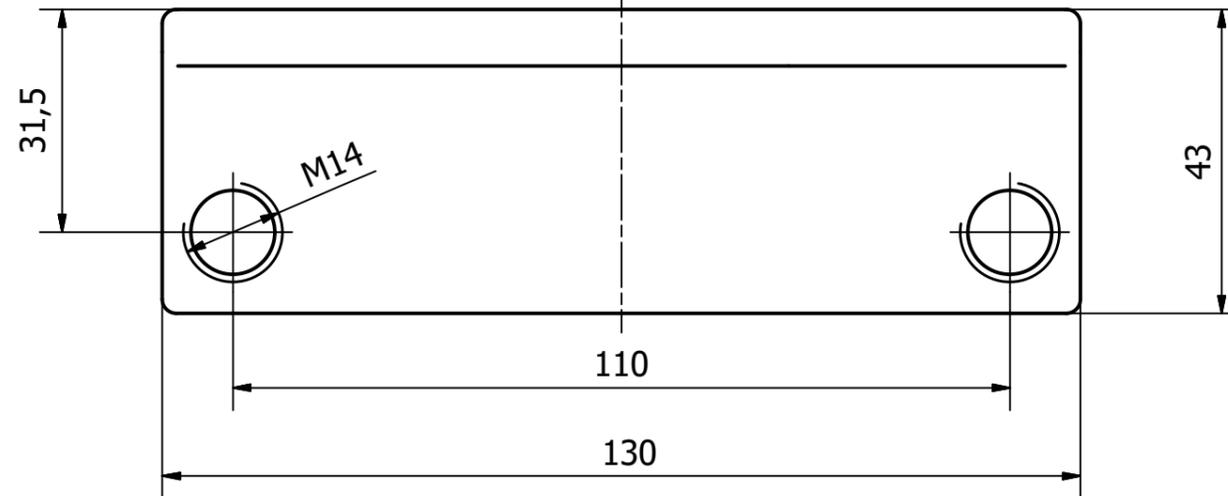
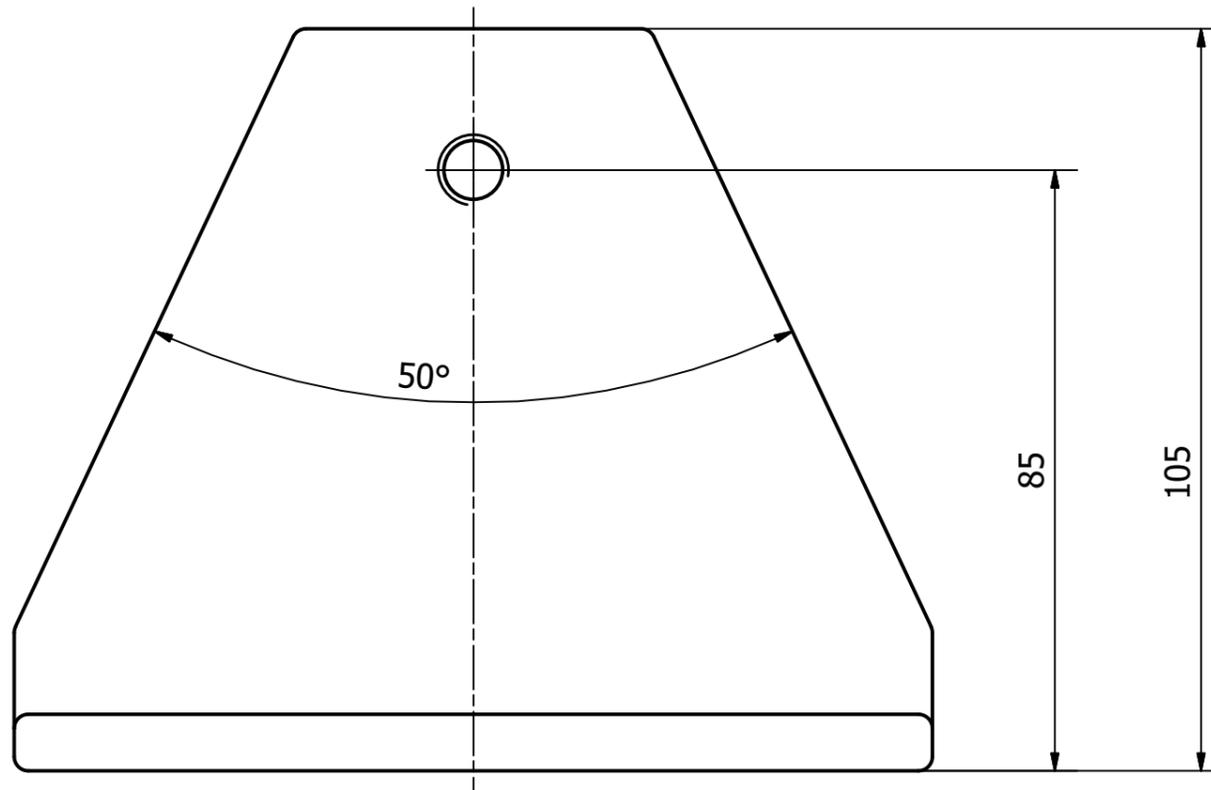
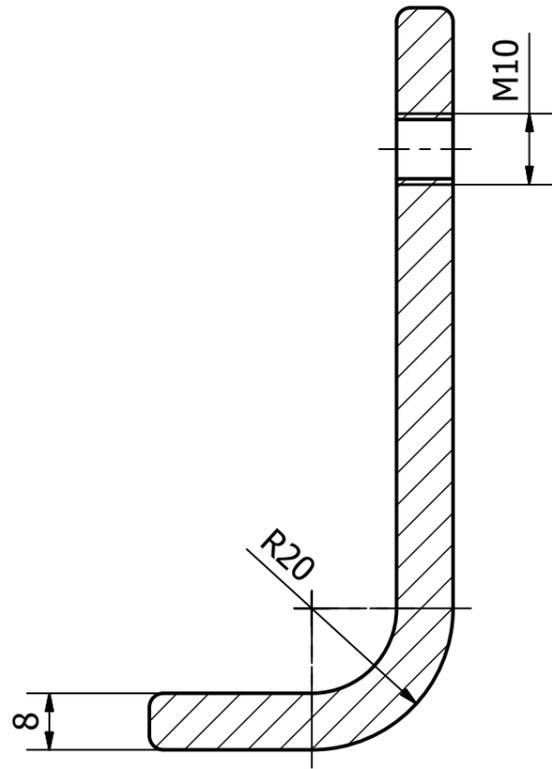
DISEÑO Y ANÁLISIS DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA

Fecha: Escala: Sistema:

6/6/2016 1:1

Plano: Nº Plano:

TAPA DE RODAMIENTOS 11/12



Redondeos no acotados R=2
 Todas las unidades en mm

TRABAJO FIN DE MÁSTER EN
 INGENIERÍA INDUSTRIAL



UNIVERSITAT
 POLITÈCNICA
 DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
 SUPERIOR INGENIEROS
 INDUSTRIALES VALENCIA

Autor: Sergio Garrido Martínez

Proyecto:
 DISEÑO Y ANÁLISIS DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA

Fecha:
 6/6/2016

Escala: Sistema:
 1:1

Plano:
 PIE SOPORTE

Nº Plano:
 12/12