



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

# DISEÑO DE UN MOTOR RADIAL DE 5 CILINDROS. GENERACIÓN DE SU PROTOTIPO VIRTUAL Y SIMULACIÓN MECÁNICA

AUTOR: JOSEP FONS SOLAZ

TUTOR: NÚRIA ALEIXOS BORRÁS

COTUTOR: FRANCISCO ALBERT GIL

Curso Académico: 2014-15



# ÍNDICE DE DOCUMENTOS

---

- DOCUMENTO MEMORIA
- DOCUMENTO ANEXOS
- DOCUMENTO PRESUPUESTO
- DOCUMENTO PLANOS



*En esta vida pots ser qui tu viigues,  
sols hi ha un obstacle, tu mateix.*



# Agradecimientos:

En primer lugar dar las gracias a mis padres, por haber sido siempre mi motivo para seguir adelante y apoyarme en cada momento de mi vida y por transmitirme su cultura de esfuerzo. A mi hermana Lorena, por ser siempre un referente para mí. A mis abuelos, porque en la vida hay cosas que solo ellos te pueden enseñar. Elegí mi camino, abuelo tal y como tú me indicaste cuando aún estabas aquí.

Por otra parte agradecer su amistad a todos mis compañeros y amigos de batallas en la universidad, en especial a Belén, por ser como es, a Arnau, por tantos momentos en los que somos uña y carne, a Miguel, a Paco y a todos los amigos del grupo V por todos los momentos compartidos, porque han sido mi familia durante estos cuatro años. A todos ellos agradecerles cada momento compartido y todo su apoyo incondicional.

Mil gracias a todos.



**Documento I:**

# Memoria



# ÍNDICE GENERAL

1.1	Contexto Tecnológico de los Motores de Combustión Interna Alternativos .....	4
1.2	Funcionamiento de los Motores Radiales .....	6
2.1	Autodesk Inventor .....	9
2.2	Método de los Elementos Finitos .....	9
2.2.1	Interpolación en Elementos Finitos.....	11
2.2.2	Interpolación con Autodesk Inventor .....	11
2.3	Parámetros Técnicos del Motor.....	12
3.1	Metodología y Partes Fundamentales del Motor .....	17
3.1.1	Pistón.....	18
3.1.2	Biela Principal .....	21
3.1.3	Biela Secundaria .....	23
3.1.4	Cilindro .....	24
3.1.5	Casquillo Superior de la Biela Secundaria .....	27
3.1.6	Casquillo Inferior de la Biela Secundaria.....	27
3.1.7	Eje Principal .....	28
3.1.8	Casquillo Inferior de la Biela Principal .....	28
3.1.9	Pasador .....	28
3.1.10	Tacos del Perno del Pistón .....	29
3.1.11	Anillos del Pistón.....	29
3.1.12	Casquillo del Pistón .....	30
3.1.13	Bloque Motor.....	30
3.1.14	Volante de Inercia.....	30
3.2	Restricciones de ensamblaje del modelo 3D.....	32
3.2.1	Ensamblaje Radial del Motor .....	32
4.1	Simulación con Inventor .....	42
4.2	Análisis de Resultados .....	44
5.1	Análisis con Inventor .....	49
5.2	Extracción de Resultados .....	49
5.3	Conclusiones del Modelo.....	52
	Bibliografía.....	57
	Lista de Figuras .....	59



El coste en ingeniería de hacer prototipos supone un gran gasto energético y monetario para la industria, por ello los ingenieros han tenido que exprimir sus conocimientos para tratar de simular, de la forma más precisa posible, el comportamiento de los materiales y las geometrías de las piezas de sus bocetos a mano alzada. Es aquí donde radica el éxito de los programas informáticos de simulación en 3D [1]. Este Trabajo Final de Grado (TFG) trata el concepto del diseño de piezas de un motor radial de cinco cilindros mediante el software Inventor Profesional 2014 de la marca comercial Autodesk Inc. Un programa que se ha utilizado durante los cursos del título de Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales en distintas asignaturas.

El motor con sus distintas piezas se diseñará gráficamente con dicha herramienta. Pieza a pieza se irá describiendo las operaciones que se van llevando a cabo para que cualquier lector de este escrito pueda ser partícipe en las acciones que se van generando y los razonamientos que hacen llegar a determinadas acciones y/o descartar otras.

Posteriormente se ensamblarán las distintas piezas y el conjunto será simulado dentro del entorno del programa que permite, mediante condiciones de contorno, el análisis mecánico del mismo. Durante la simulación se formularán algunas hipótesis de partida para llegar a los objetivos marcados como alternativa a las tantas variables que se bajaran.

Finalmente, durante el último escalón del trabajo, se llevará a cabo el análisis estructural de la biela principal del motor radial mediante el método de elementos finitos a partir de las reacciones transmitidas por la geometría y disposición de las piezas del motor, que permitirá determinar si los materiales escogidos, a priori, son apropiados o no para los esfuerzos generados en el movimiento habitual del conjunto motor. Esta determinación se expondrá a la llegada de las conclusiones en el apartado correspondiente.

Como nota, cabe mencionar que este TFG se ha abordado directamente desde la representación de los planos para un motor radial del mismo número de cilindros. El problema abordado desde otro punto de vista, con una hipótesis de partida como puede ser un par de rotación del eje motor o una fuerza aplicada directamente sobre el pistón, supondría como objetivo el dimensionamiento de forma analítica y no de forma gráfica de dicho motor, objetivo que queda fuera de este trabajo.

La motivación en la realización de este proyecto como trabajo académico, figura en la idea de ir más allá de los conceptos que se han estado viendo a lo largo de esta carrera. Programas como Autodesk Inventor se usan como forma de familiarización al mundo CAD, pues programas de gama media como puede ser el utilizado en este TFG, dan una gran idea de lo que, a nivel futuro ingeniero, se utiliza en el mundo laboral. Así programas de otras marcas comerciales considerados como gama alta en la industria, como pueda ser SolidWorks o Catia de la marca Dassault Systèmes SolidWorks Corp., o NX de la casa Siemens utilizan los mismos conceptos que sostiene este programa pero ofrecen soluciones de mayor consistencia. Pese a esto, entender el funcionamiento de forma sencilla de estos programas acerca la forma de pensar de aquel que sabe utilizarlo, a soluciones de gran envergadura. Además de las diversas interacciones que permite el software como es, el análisis mediante el Método de Elementos Finitos (MEF) entre otros.

## 1.1 Contexto Tecnológico de los Motores de Combustión Interna Alternativos

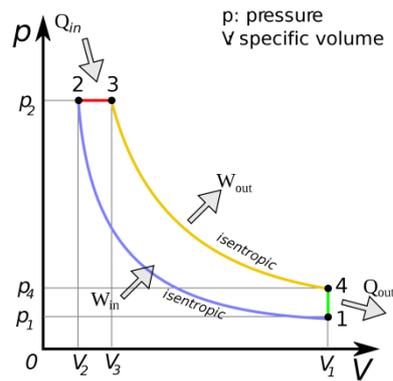
Los motores de combustión interna se pueden clasificar en dos tipos según su movimiento. En primer lugar, los motores rotativos, motores en los que no existen pistones sino que utilizan rotores y que raramente se usan pese a que fueron concebidos para evitar el ruido y la facilidad de funcionamiento. Comercialmente solo se han visto en el mercado en modelos de automoción como el Mercedes Benz C 111 [2], aunque este tipo de motor se relaciona por los amantes del motor con la marca japonesa Mazda y su modelo RX-8.

Los Motores de Combustión Interna Alternativos (MCIA) tal y como los conocemos ahora aparecen por primera vez en el año 1876 de la mano del alemán Nicolaus Otto. El motor de Otto marcó la dirección que seguirían los nuevos avances en materia de MCIA.

Hoy en día todos los motores que se pueden encontrar en el mercado de consumo comparten una característica principal; son máquinas de desplazamiento positivo, ya que el fluido de trabajo está contenido dentro de un espacio delimitado por superficies móviles, que con su movimiento, modifican el volumen de la masa de fluido que pasa por el motor. Es sencillo imaginar a grandes rasgos qué ocurre en el interior de un pistón, debido a la compresión y expansión de un gas, y cómo se obtiene trabajo mecánico de este modo. Por ello, los primeros MCIA se desarrollaron de manera esencialmente empírica. Los Motores de Encendido por Compresión (MEC), conocidos como motores diesel en honor al ingeniero francés de origen alemán Rudolf Diesel, surgen de la investigación con combustibles diferentes a la gasolina para obtener un mayor rendimiento térmico. En la actualidad, los motores son mucho más complejos que entonces, sin embargo mantienen el mismo principio de funcionamiento. El ciclo de trabajo de un motor de encendido por compresión consta de cuatro etapas bien definidas, estas son:

- Admisión. El fluido, en este caso aire, entra en el motor.
- Compresión. El fluido es comprimido por la acción del pistón.
- Combustión/Expansión. La combustión de la mezcla provoca un aumento de la temperatura con la consiguiente expansión del fluido.
- Escape. Los subproductos de la combustión son empujados a salir a la atmósfera.

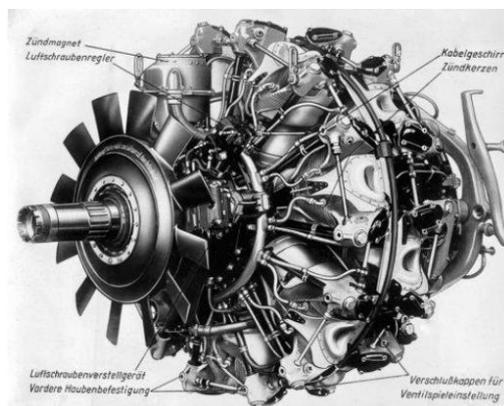
Las diferentes etapas pueden verse en el diagrama presión-volumen representado en la Figura 1.1.1: *Diagrama presión-volumen ciclo diesel*.



**Figura 1.1.1:** Diagrama presión-volumen ciclo diesel

Además, en lo que se refiere a actividades marítimas como el transporte intercontinental de contenedores o la pesca, también predomina el motor de encendido por compresión por el menor coste y mayor poder calorífico del diesel frente a la gasolina.

En los primeros casos de la aviación también se utilizaron MCIA. Con la tipología del motor radial o motor estrella que es un tipo de disposición del motor de combustión interna, en la cual los cilindros van ubicados radialmente respecto del cigüeñal, formando una estrella. Esta configuración fue muy usada en aviación, sobre todo en grandes aviones civiles y militares, hasta la aparición del motor a reacción, debido a su mejor relación peso/potencia, quedando actualmente relegados casi en su totalidad al uso en motores de avionetas ligeras.



**Figura 1.1.2:** Motor Radial

## 1.2 Funcionamiento de los Motores Radiales

En este motor los pistones van conectados por un mecanismo de biela - manivela, distinto de los motores en línea. Uno de los pistones está conectado a una biela más grande que las demás, esta es la llamada biela principal, que a su vez está conectada directamente con el cigüeñal. Los otros pistones están conectados a bielas más pequeñas (bielas secundarias) que están conectadas a la biela de mayor tamaño. Al conjunto de pistones, biela maestra y bielas secundarias se le conoce como estrella debido a la similitud con esa forma, de ahí su nombre. El número de pistones de una estrella es generalmente impar, pues así el orden de encendido minimiza las vibraciones, por ello se pueden encontrar hoy en día motores radiales, en el mundo de la aviación de aeronaves de recreo, de siete y nueve cilindros por etapa. Donde cada una de las etapas o conjunto de estrellas se llaman fases.

Aparte de esta tipología también se utilizó para motores de aviación de la II Guerra Mundial, aviones con motores en línea y en forma de V.

El motor radial fue por su mecánica sencilla el más popular y muchas armadas lo usaron por su fiabilidad (sobre todo para vuelos sobre grandes superficies desérticas o sobre agua) y por su bajo peso (uso en portaaviones) [3]. Estos motores se consideraban por su robustez, ya que eran capaces de funcionar en las peores condiciones. Además de la ventaja que suponía poder arrancar estos aparatos con solamente el movimiento de la hélice. Junto con la versatilidad que caracteriza a los Motores de Encendido Provocado (MEP) debido a la regulación cuantitativa de la mezcla que da como resultado la regulación de carga sobre el motor. [4]

Algunos aviones caza de la segunda guerra mundial, como el Supermarine Spitfire o el Messerschmitt Bf-109 utilizaron motores en V, buscando una línea aerodinámica más fina, en cambio la Armada de los Estados Unidos utilizó para casi todos sus aviones el motor radial. Comercialmente se pueden vender en empresas dedicadas a este sector como Rotec Engineering, o Pratt & Whitney pero su uso es prácticamente escaso en la actualidad debido a mejoras en el funcionamiento con las turbinas de reacción debido a que el régimen de funcionamiento de los motores de reacción es más estable.

# Capítulo 2: Materiales y Métodos

2.1	Autodesk Inventor .....	9
2.2	Método de los Elementos Finitos .....	9
2.2.1	Interpolación en Elementos Finitos.....	11
2.2.2	Interpolación con Autodesk Inventor .....	11
2.3	Parámetros Técnicos del Motor .....	12



## 2.1 Autodesk Inventor

Autodesk Inventor es un programa que nace a raíz de la demanda por parte de, principalmente, los ingenieros de mecánica y materiales por realizar bocetos en 3D de piezas que hasta el momento se tenían que fabricar mediante elementos a escala para poder realizar las pertinentes pruebas. Aunque lo hace más tarde que sus competencias, quienes también vieron la demanda de mercado en este aspecto, ya que a finales de la década de los 90 otros programas como Catia o Pro Engineer (ahora PTC) ya llevaban un tiempo en el mundo de la ingeniería. Tal vez por eso Inventor se considere ahora un programa de gama media.

Este programa de la casa Autodesk se basa en técnicas de modelado paramétrico. Un modelador paramétrico significa que se permite al usuario modelar la dimensión y material de manera que si se cambian las dimensiones, la geometría actualiza de forma automática basándose en las nuevas cotas. Además, Inventor también tiene herramientas para la creación de piezas metálicas o de chapa.

A parte del diseño de piezas y su modificación, estas se pueden ensamblar para realizar conjuntos. Estos se forman añadiendo restricciones de movimientos a las piezas. Sin hablar de la ventaja de esta forma de diseño que se basa en geometrías parcialmente restringidas, de forma que después se pueden completar más adelante de un modo más flexible que otros programas como en PTC, es decir, sin tener que hacer de nuevo la partición entera. Este sistema de modelado es mucho más intuitivo que en ambientes antiguos de modelado, en los que para cambiar dimensiones básicas era necesario eliminar piezas o incluso el archivo completo y empezar desde cero.

Inventor utiliza formatos específicos de archivo para las piezas (.IPT), ensamblajes (.IAM), vista del dibujo (.IDW y .DWG) y presentaciones (.IPN), pero el formato del archivo de AutoCAD “.DWG” puede ser importado / exportado como boceto, lo que supone una gran facilidad de intercambio entre software. Al igual que para el caso de post-procesados mediante herramientas, como por ejemplo con el programa Ansys, ya que los archivos que se extraen de Inventor durante la simulación dinámica, pueden ser después tratados con este otro software, por ejemplo, para realizar un análisis mediante el Método de Elementos Finitos.

## 2.2 Método de los Elementos Finitos

Como se ha citado en el capítulo anterior durante la breve introducción y exposición de los objetivos de este trabajo académico, una de los puntos que se va a tratar es el análisis estructural de la biela principal utilizando el Método de los Elementos Finitos (MEF). Por tanto se debe entender primero dónde radica el éxito de este método y su aplicación.

Los problemas físicos pueden clasificarse en dos categorías: los sistemas discretos y los sistemas continuos. Considerando las leyes de la física, un problema de ingeniería se representa por:

- a) Un sistema discreto caracterizado por un conjunto de ecuaciones algebraicas que relacionan un número concreto de incógnitas o Grados De Libertad (GDL).

- b) Un sistema continuo que está caracterizado por un conjunto de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales con sus correspondientes condiciones de contorno (problema de contorno). En ocasiones, es posible obtener una formulación equivalente en términos de ecuaciones integrales.

La solución del problema, en el primer caso es relativamente simple, ya que consiste en encontrar la solución (ya sea analítica o gráficamente) del sistema de ecuaciones algebraicas. En el segundo caso, la solución del problema es más compleja.

La mejor forma de resolver un problema gobernado por ecuaciones diferenciales es obtener una solución analítica. Sin embargo, existen muchas situaciones en que la solución analítica es difícil de obtener.

Cuando no es posible encontrar la solución hay que recurrir a una solución numérica aproximada. El objetivo pues será encontrar una solución con un error inferior al admisible para su utilización en ingeniería. Existen diferentes métodos aproximados para la resolución de problemas de contorno. Los más generales se pueden resumir en los siguientes:

- 1) Método de las diferencias finitas
- 2) Método de los volúmenes finitos
- 3) Método de los elementos finitos
- 4) Método de los elementos de contorno

De estos métodos, el más utilizado actualmente con diferencia para gran número de aplicaciones en ingeniería, es el método de los elemento finitos, tanto en problemas lineales como no lineales. Métodos como el de las diferencias finitas y el de volúmenes finitos tienen una especial importancia en mecánica de fluidos, mientras que el de elementos de contorno queda reservado para aplicaciones más específicas dentro del campo de la ingeniería como el electromagnetismo.

Así, el método de los elementos finitos se basa en los siguientes puntos:

- El dominio de definición del problema se discretiza en una serie de puntos denominados nodos. De esta forma, los valores nodales de la función incógnita del problema de contorno pasan a ser las nuevas incógnitas del problema.
- El dominio se subdivide en un conjunto de subdominios (de ahí el nombre de elementos finitos) definidos por los nodos que conecta. Para cada elemento se define localmente una función de prueba, normalmente polinómica, aproximando la función incógnita dentro del elemento en general en función del valor de la misma en los nodos (interpolación nodal).
- Las ecuaciones de comportamiento aproximadas pueden calcularse mediante el ensamblado de las ecuaciones de comportamiento de cada elemento finito.

Como es lógico pensar, el análisis mediante elementos finitos de un problema real lleva asociado generalmente un gran volumen de datos y resultados, y la resolución de ecuaciones, que no se pueden hallar sin la ayuda de un ordenador.

Históricamente se tiene que llegar a la década de los 50 para ver que los ingenieros de la época empezaran a desarrollar el análisis de sistemas estructurales complejos. Una década después, se establecieron las bases teóricas por matemáticos de la talla de Gauss o Cholesky. Dado que con

el volumen de datos que ocupa el uso de este método se requiere de un ordenador, el método es obvio que presente características que lo hacen especialmente adecuado para que sea programado de forma sistemática.

Además, una característica básica del método consiste en interpolar, dentro de cada elemento finito, el valor de las funciones incógnita en función de sus correspondientes valores nodales.

### **2.2.1 Interpolación en Elementos Finitos**

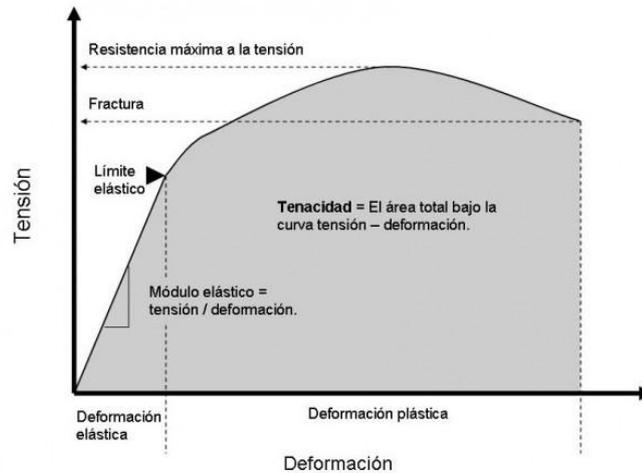
Interpolar se entiende como aproximar el valor de una función entre conocidos, en base al valor de dicha función en tales puntos. En elementos finitos, la función incógnita se sustituye por una función aproximada, construida a tramos dentro de cada elemento, y en función del valor de la misma en los nodos. En general se utilizan funciones de interpolación polinómicas, como ya se ha mencionado. Tales funciones permiten formular de forma más sencilla el método de los elementos finitos y permiten aumentar la precisión incrementando el orden del polinomio de interpolación (en teoría, un polinomio de orden infinito corresponde a la solución exacta).

Se pueden definir básicamente dos familias, la triangular y la cuadrilátera. Los elementos de orden superior son los cuadráticos. Con esto es entendible el pensar que se presentarán errores debidos a la discretización, especialmente alrededor de los bordes curvos, sobre todo en componentes geoméricamente complejos [5]. Estos errores se pueden reducir especificando más elementos o utilizando polinomios de orden superior para aproximar la distribución de la cantidad sobre los elementos.

### **2.2.2 Interpolación con Autodesk Inventor**

Al igual que otros muchos programas, Autodesk Inventor realiza esta interpolación mediante el proceso de refinado-H, en el cual se sigue un procedimiento iterativo de reducción del número de elementos en cada iteración hasta que los resultados convergen. Aunque también es posible utilizar el proceso de refinado-P. Este otro proceso de refinado se basa en incrementar el orden superior de los polinomios, eso sí, se tiene que conservar el triángulo de Pascal, es decir, conviene completar un estrato antes de pasar al siguiente. Además de utilizar un proceso adaptativo, es decir, en aquellas partes de la figura donde se detecta mayor tensión, el programa trata de refinar los elementos, así mejora la aproximación sin tener el problema de la acumulación de cálculos y el posible error de redondeo.

Autodesk Inventor sólo puede realizar análisis lineales en componentes con pequeñas deformaciones, en condiciones de cargas operativas. El análisis no lineal aparece en aquellos componentes que experimentan grandes deformaciones y corren el riesgo de superar su límite de elasticidad. Por tanto solamente se contempla el comportamiento dentro de la ley de Hook, o lo que es lo mismo, el módulo de Young es igual a la tensión aplicada sobre el cuerpo dividida por la deformación unitaria. En la siguiente figura se puede observar un comportamiento lineal y un comportamiento no lineal.



**Figura 2.2.1:** Comportamiento lineal (recta a la izquierda del triángulo) frente al comportamiento no lineal (recta a la derecha del mismo punto)

Como hipótesis de partida para los cálculos que se realizan internamente en el software se asume que:

- Las propiedades materiales del componente permanecen lineales una vez superado el límite de rendimiento. Por lo tanto los resultados obtenidos más allá de este límite carecen de validez.
- Las desviaciones de los componentes son pequeñas si se las compara con el tamaño total del componente.
- Los componentes son rígidos y dúctiles como el metal, no como pudiese ser la goma.
- Los componentes se deforman por igual en las tres direcciones del espacio, es decir las propiedades del material son isotrópicas.

## 2.3 Parámetros Técnicos del Motor

Para poder representar gráficamente el motor radial se han escogido las piezas de una web ([http://www.cadcim.com/students\\_project/advance\\_projects.htm](http://www.cadcim.com/students_project/advance_projects.htm)) y los planos de estas piezas figuran en los Anexos de este documento. Ya que casas comerciales de motores de aviación, como las citadas en el anterior capítulo, (p.e. la empresa australiana Rotec Engineering o la americana Pratt & Whitney) no ofrecen, especificaciones exactas de sus piezas, simplemente muestran parámetros técnicos de sus motores comerciales para evitar copias exactas de sus productos.

El conjunto del motor radial estará formado por cinco cilindros con sus respectivas bielas. Como nota, remarcar que no es habitual que estén formados estos motores de tipología radial por tan pocos cilindros por fase, ya que lo que se intenta es buscar la máxima potencia por fase, o estrella. Por tanto actualmente las empresas que se dedican aún a fabricar estos motores montan de 7 a 9 cilindros por fase.

En el motor del caso de estudio, las bielas se dividirán en dos tipologías, ya que una de las cinco bielas será la llamada biela principal mientras que las cuatro restantes son de menor grosor y van unidas a la biela principal, la cual en la parte inferior tiene insertada el eje principal.

Por lo que representa a las dimensiones del motor de caso de estudio. Si se consideran las fórmulas:

$$A = (\pi D^2)/4 \quad (2.1)$$

$$V = A \cdot S \quad (2.2)$$

Siendo  $A$  el área del pistón,  $D$  el diámetro del mismo,  $V$  el volumen unitario por pistón y  $S$  la carrera, entendiendo este concepto de carrera como la diferencia entre el Punto Muerto Superior (PMS) y el Punto Muerto Inferior (PMI) durante el movimiento del pistón se obtiene que  $S$  tiene un valor fijo de 100 mm debido a la disposición de los dos puntos muertos. Por lo que representa al área, adquiere un valor de 6647.61 mm<sup>2</sup> según el diámetro de 92 mm. Por tanto el volumen,  $V$ , se cifra en 664761 mm<sup>3</sup>. O lo que es lo mismo 0.665 E-03 m<sup>3</sup>, y como es habitual en el mundo del motor representar este valor en litros, 0.665 litros por cilindro será la cilindrada unitaria. Dado que este motor está compuesto por cinco cilindros idénticos la cilindrada total es de 3.325 litros.

Como nota aclaratoria, mencionar que, el bloque motor, el volante de inercia encargado de mantener el giro del sistema motor y los cilindros aleteados, propios de esta tipología de motor, han sido adaptados según las necesidades del mismo motor, ya que, la página web de la que se han extraído las piezas no contemplaban el posible ensamblaje mediante un bloque motor. Por ello, el bloque motor se ha adaptado como un pentágono que aloja todos los elementos de conjunto motor.



# Capítulo 3: DISEÑO DE LAS PIEZAS DEL MOTOR RADIAL CON AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL 2014

3.1	Metodología y Partes Fundamentales del Motor .....	17
3.1.1	Pistón.....	18
3.1.2	Biela Principal .....	21
3.1.3	Biela Secundaria .....	23
3.1.4	Cilindro .....	24
3.1.5	Casquillo Superior de la Biela Secundaria .....	27
3.1.6	Casquillo Inferior de la Biela Secundaria.....	27
3.1.7	Eje Principal .....	28
3.1.8	Casquillo Inferior de la Biela Principal.....	28
3.1.9	Pasador .....	28
3.1.10	Tacos del Perno del Pistón .....	29
3.1.11	Anillos del Pistón.....	29
3.1.12	Casquillo del Pistón .....	30
3.1.13	Bloque Motor.....	30
3.1.14	Volante de Inercia.....	30
3.2	Restricciones de ensamblaje del modelo 3D.....	32
3.2.1	Ensamblaje Radial del Motor .....	32



En este capítulo se va a utilizar el software de la marca Autodesk para la generación en 3D de las piezas del motor radial que será el caso de estudio. Mediante este programa se realizarán los distintos bocetos que darán lugar a las operaciones de moldeo de las piezas que finalmente conformarán el motor radial de 5 cilindros. Para ello se utilizarán las herramientas que el programa aporta.

Una vez generadas las piezas, se realizará un ensamblaje en 3D de estas mediante la restricción de movimientos que restarán Grados De Libertad (GDL) al conjunto. De esta forma cuando se finalice el ensamblaje solamente quedará un Grado De Libertad que será el movimiento de rotación del eje motor, que permitirá por tanto el movimiento del conjunto motor.

Paso a paso se irán detallando las piezas y operaciones, en primer lugar, y restricciones, en segundo, para que en ningún momento se dé lugar a una pérdida del lector de forma que cualquier receptor de esta información sea capaz de calcar los movimientos y por tanto obtener el mismo resultado.

### 3.1 Metodología y Partes Fundamentales del Motor

Como anteriormente se ha explicado, las dimensiones del motor del caso de estudio corresponden a un motor radial de cinco cilindros uniformemente distribuidos en un mismo plano a lo largo de  $360^\circ$ . Este motor se basa en una biela principal y cuatro bielas más pequeñas. La biela principal hace de referencia, en cuanto al movimiento se refiere, mientras que las otras siguen su movimiento. En la parte superior de todas las bielas se sitúan los cinco pistones con sus respectivos cinco cilindros. Con ello y por el diseño intrínseco del motor los cilindros han sido aleteados para simular lo más fidedignamente posible la refrigeración por aire que estos motores adquieren.



**Figura 3.1.1:** Forma de las bielas secundarias (pequeñas) y la biela principal en un motor radial de 9 cilindros

Por tanto las partes que se van a modelar son:

- Pistón
- Biela Principal
- Biela Secundaria
- Cilindro
- Casquillo inferior de la biela secundaria (biela pequeña)
- Casquillo superior de la biela secundaria (misma dimensión que para la parte superior de la biela principal)
- Casquillo inferior de la biela principal
- Eje principal
- Pasador (biela grande-bielas pequeñas)
- Tacos (para el pistón)
- Arandelas (para el pistón)
- Casquillo biela-pistón
- Bloque motor
- Volante de inercia

### 3.1.1 Pistón

Para empezar, se tiene que abrir un nuevo elemento de diseño mediante la opción de *Nuevo*, se selecciona la opción de *Normal.ipt* (“i” de Inventor y “pt” de part en inglés) y se crea el archivo con *Crear*. A continuación, se realiza un boceto en la opción de *Boceto en 2D* y se escoge uno de los planos donde se empieza a dibujar la pieza. Este paso tendrá que repetirse para todas las piezas modeladas.

Para el caso particular del pistón se dibuja un círculo con la dimensión del diámetro del mismo, para el caso de estudio este será de 92 mm. Como recomendación, mediante la herramienta de proyectar geometría se debe proyectar los planos donde se está realizando el boceto para que de esta forma se restrinja la posición inicial del centro del círculo creado.

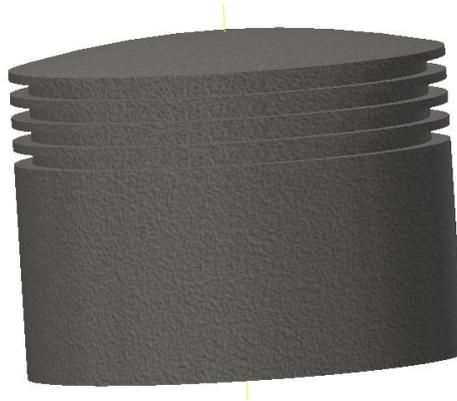
A continuación se realiza una extrusión con la altura del pistón. Para este pistón y el resto de los que se irán creando la altura es de 66 mm. Durante esta extrusión la mejor dirección para realizarla es de forma que el plano en el que se ha creado el círculo quede en la parte inferior, así esta cara siempre servirá como referencia para posteriores movimientos de moldeo.

Para que la difusión de la mezcla sea la apropiada, la cabeza del pistón tiene un pequeño abombamiento desde el lateral hasta el centro de la geometría. Para generar esta forma se debe realizar un boceto nuevo. Para ver mejor qué es lo que se está dibujando en el boceto y hasta dónde tiene que llegar, resulta apropiado utilizar el plano de corte, esto se puede activar con el botón F7. El abombamiento tendrá un radio de 189 mm y culminará en el centro. Aquí se cerrará la figura.

Posteriormente se tiene que hacer una revolución de la zona que se acaba de crear para que se complete en toda la parte superior del que ahora es un cilindro y que será un pistón tras algunos cambios. Para terminar de realizar la revolución se elige el eje que pasa por el centro del pistón.

El siguiente paso es realizar las pequeñas hendiduras donde posteriormente se insertarán las arandelas que hacen la función de rascadores de aceite y proporcionan estanqueidad al conjunto del

pistón- cilindro. Para ello se realizará un nuevo boceto en el plano que corta la sección transversal del pistón. Para ver mejor qué se está dibujando es recomendable mostrar el plano de corte como anteriormente ya se ha hecho. Las hendiduras de la parte superior (4 en total) tendrán una altura de 3 mm y una profundidad de 4 mm y estarán separadas entre sí 2 mm y se realizarán mediante patrón rectangular.



**Figura 3.1.2:** Hendiduras para posicionar las arandelas de estanqueidad

En la parte inferior se realiza de la misma forma otra hendidura, en este caso para el anillo rascador de aceite. Para este, las dimensiones son distintas según los planos de apoyo, pero para evitar después tener que realizar otra arandela, y ya que el documento de planos que se ha escogido no contempla ninguna figura más, se van a utilizar las mismas dimensiones, es decir la altura sigue siendo de 3mm pero el borde superior está a 7 mm de la cara inferior del pistón. Como en el anterior caso, se utilizará la herramienta de revolución para crear la forma que se requiere, pero dado que ahora se pretende quitar materia y no crearla, se tendrá que seleccionar la segunda opción que lo permite, ya que en el caso anterior para el abombamiento, se ha utilizado la primera. El eje sigue siendo el mismo, el que pasa por el centro geométrico de la pieza. De esa forma se obtiene la figura con las hendiduras.

El siguiente paso radica en la acción de vaciado del pistón para poder alojar en su interior la biela que tendrá un movimiento relativo durante el proceso de combustión en el funcionamiento del motor. Para realizar este vaciado interior, la mejor opción es realizar un boceto y, como en el caso anterior, mostrar el plano de corte (mediante el comando de la tecla F7 del teclado). En este caso además es recomendable proyectar las aristas de corte exteriores de la pieza para acotar mejor los rectángulos que se van a crear y a los que posteriormente se les realizará una operación de revolución para que afecte a todo el conjunto de la pieza. Cabe remarcar que cualquier figura que se crea debe restringirse totalmente. Como ayuda, en la parte inferior derecha del programa va indicando cuantas cotas se necesitan para restringir totalmente el boceto. De esta forma, delante de una futura modificación la figura entera variará pero conservará la o las geometrías que se hayan estado creando. Tras restringir las geometrías del boceto, se vuelve a realizar una revolución, como en el caso anterior, de corte.

A continuación se tendrá que practicar un agujero pasante de parte a parte del pistón, dónde, en su interior, se situará el bulón que sostendrá la parte superior de la biela. Este agujero pasante se sitúa a 27 mm de la cara inferior del pistón, en medio de la cara lateral. Por tanto, para situar el punto que después hará de marca de referencia para el agujero lo más recomendable es realizar un desfase, a 46 mm (ya que es la distancia desde el centro hasta la cara donde se realiza el

agujero), del plano donde se había realizado el vaciado, es decir, el plano que contiene el boceto de la pieza.

El agujero que posteriormente se le practica es de 22 mm de diámetro, que será necesario para el posterior ensamblaje de piezas. Pero dado que el agujero no es un agujero solamente sino que tiene un escariado se utiliza la segunda opción dentro de la herramienta de agujero. Las características para este escariado son 36 mm de diámetro de la parte más ancha, 22mm para el agujero que se adentra en el pistón, 4 mm de penetración de la corona del escariador y 25 mm para la profundidad del agujero. Como remarque, indicar que los 25 mm de la profundidad podrían ser más, ya que el único requerimiento de esta operación es que llegue al interior del vaciado realizado antes.

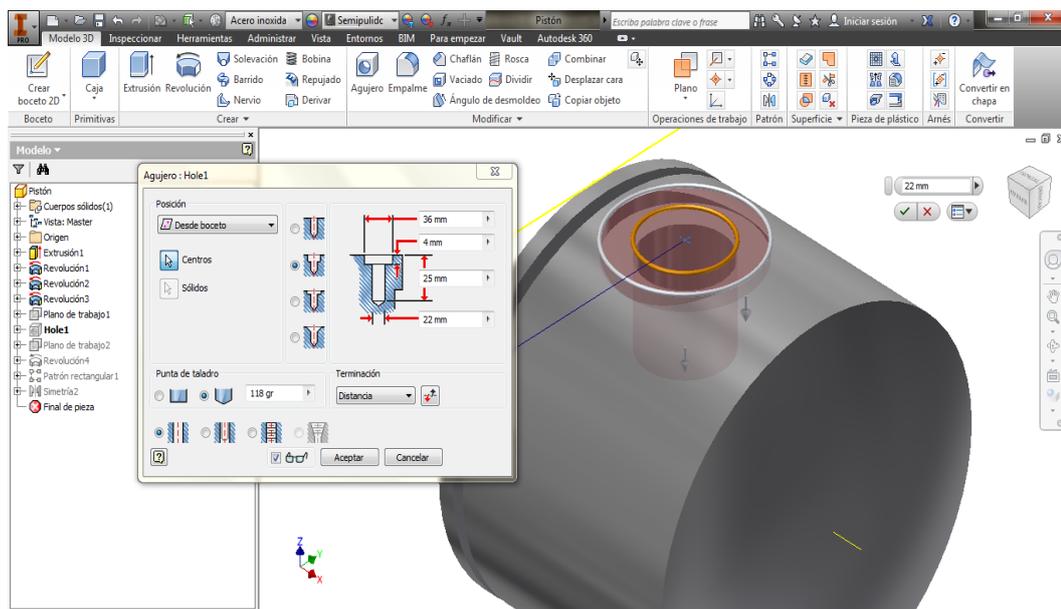


Figura 3.1.3: Escariado del agujero

Dado que ya se tiene esta operación en una cara repetir este proceso es perder tiempo, por ello el programa ofrece la oportunidad de utilizar la herramienta de simetría, que permite realizar la misma operación separada por un plano simétrico a las dos posiciones. Es aquí cuando se utiliza la idea que antes se había estado comentando sobre la posición de los bocetos, pues solamente se necesita marcar la opción de la herramienta e indicar el plano de simetría para devolver a la pieza esta característica y de esta forma ahorrar tiempo.

Finalmente se le da propiedades físicas a la figura que se acaba de crear ya que estas serán decisivas a la hora de realizar la simulación mecánica, de esa forma se aproxima mejor el comportamiento de la pieza. Haciendo clic con el ratón sobre el árbol de operaciones y seleccionando *iproperties* se abre un menú contextual. En este menú, en la última pestaña de la derecha se indican las propiedades. Para la mayoría de las piezas de las que se están generando se utilizará el acero inoxidable. En el resto de casos, como por ejemplo el eje motor, será de acero fundido, por simular más las características físicas a la realidad.

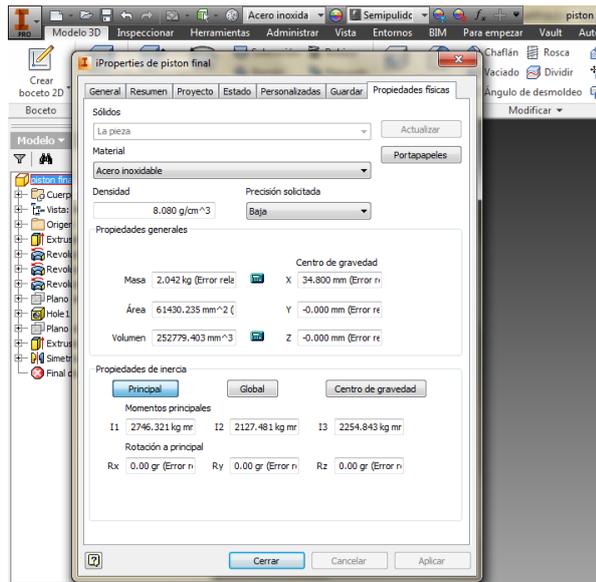


Figura 3.1.4: Se le atribuyen propiedades físicas que después se utilizarán durante la simulación mecánica

### 3.1.2 Biela Principal

A continuación se detallan las operaciones correspondientes a generación de la biela principal o biela grande. En primer lugar se empieza con un boceto donde se dibuja la forma de la parte inferior de la biela, luego se acota de forma que no queden dimensiones por definir. Durante la generación de esta pieza conviene situar el origen en el centro del que después será el agujero por donde pasará el eje principal, además de proyectar, como ya se ha estado haciendo en la otra figura anterior, los planos para tenerlos como referencia.

Como las dos caras de la biela principal en la parte inferior de la misma son simétricas respecto a un plano que las separa en dos mitades iguales, solamente hará falta realizar una. La otra se creará mediante la operación de simetría.

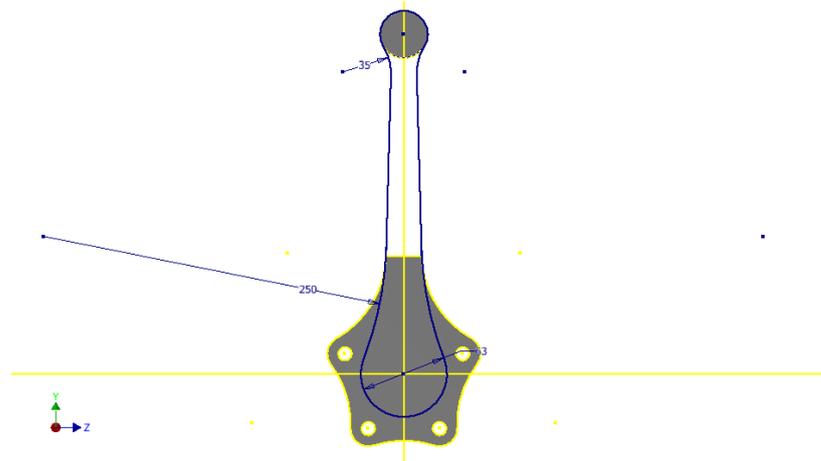
Para proceder se realizará una extrusión del primer boceto creado. En este boceto únicamente se incluyen los agujeros de 10 mm y se acota de forma simétrica (es aquí donde se identifica un error en los planos de la página web que se han utilizado como apoyo en la generación de las piezas por no cumplir con la idea de la acotación simétrica en piezas se simetría). Tras estos movimientos y la mencionada operación de simetría, ya se puede pasar a la siguiente geometría, el cilindro que posteriormente se agujereará para dar cabida en su interior al casquillo que unirá la biela al pistón.

El círculo que se tiene que crear aquí es de 35 mm de diámetro y, mediante una extrusión de 42 mm de forma simétrica (se vuelve a recomendar utilizar el plano de trabajo que parte a las dos mitades anteriormente creadas) se crea la geometría apropiada.

Para el cuerpo de la biela, en primer lugar se tiene que disponer un boceto en el mismo plano de trabajo (plano simétrico de la pieza) en el que se realizará un círculo de 63 mm de diámetro centrado en el centro del origen (es aquí donde se utiliza la recomendación citada con

anterioridad). En la parte superior de la biela, se proyectará la geometría circular de 35 mm y se realizará un empalme de 35 mm con dos rectas simétricas respecto del otro plano que corta transversalmente a la biela. Estas rectas tienen que pasar por el borde que se ha creado a priori, con la primera geometría simétrica, cuyo ancho es 26 mm.

El cuerpo de la biela principal se puede observar que tiene un pequeño problema, ya que en los planos de la página web no se hace referencia a la forma que esta tiene, por tanto no queda bien definida, pero dado que el cuerpo tiene que ser macizo, se ha tenido que inventar un empalme de 250 mm de radio entre el círculo de 63 mm de diámetro y las rectas simétricas respecto al plano que corta el cuerpo de la biela de forma transversal.



**Figura 3.1.5:** Dado que el cuerpo de la biela no queda del todo claro se ha tenido que inventar un radio de empalme de 250 mm para cubrir esa carencia en los planos de forma que se respete de la mejor forma posible las otras restricciones

Una vez que se ha creado este boceto, se extruye 28 mm de forma simétrica desde el plano del boceto. Como se puede observar en los planos de apoyo para la generación de las piezas, esta pieza tiene, por encima del cuerpo que se ha extruido, otra extrusión. Lo que no supone ninguna dificultad ya que mediante un nuevo boceto sobre la primera geometría que se creó se puede generar este nuevo cuerpo. Y, de forma simétrica, a la otra cara de la pieza se realiza la misma operación. El siguiente paso es realizar los dos agujeros pasantes por donde se insertarán los casquillos de la biela. En la parte inferior el agujero será de 52 mm de diámetro, mientras que en la parte superior, el orificio será de 24 mm.

Como se puede observar en los planos, en el cuerpo de la biela hay una extrusión negativa que hace que solamente haya 5 mm de espesor de material en el cuerpo (viendo el corte A-A de la biela en los planos se observa mejor). Este paso no resulta tampoco complicado, solamente se tendrá que hacer el pertinente boceto y extruir y, de forma simétrica, realizar la operación en la otra cara. Tal vez el paso que resulta más complicado a la hora de generar la forma de esta biela es la que tiene debida al radio de cota 78 mm que se muestra en el corte A-A de los planos. Además, el autor de estos planos de la página web, vuelve a errar dado que la cota 2° debería estar referida de forma simétrica, es decir, marcar los 4° que sería la cota más apropiada para respetar la simetría de la pieza. El caso es que para poder realizar ese radio de 78 mm y que la biela adquiriera la forma correcta, una de las decisiones que se puede tomar, es crear una arista en esa posición y después realizar un empalme en 3D con el radio solicitado. Este es el paso que se ha realizado para la generación de esta pieza, por su rapidez y facilidad de cambio, ya que si pasado un tiempo, se

necesita modificar y por tanto dar menor radio de empalme, mediante una simple modificación se obtendría el nuevo cuerpo de la pieza. Eso sí, para generar esa arista a 87 mm del centro del agujero de mayor tamaño (52 mm de diámetro) se tiene que realizar un boceto en el plano que corta la pieza de forma transversal y después extruir con la opción de corte hacia los dos lados, una operación que no es nada intuitiva pero debido a la complejidad de la pieza en esta parte del cuerpo, se ha tenido que llevar a cabo.

Tras la extrusión que se ha comentado se generan, además de la ya citada arista que luego se convierte en un radio de empalme de 78 mm, otras aristas en la parte que une el cuerpo de la biela con el cilindro de la parte superior, el de 35 mm de diámetro, es por ello que otra vez se tiene que echar mano de la herramienta empalme en 3D. En este caso se repite esta operación en las cuatro aristas (dos en cada cara de la pieza alrededor del citado cilindro) con un radio de empalme de 17,5 mm. Esta operación deja completamente la pieza terminada según el plano que se ha tomado como referencia. Adaptando, en cada caso, las necesidades y las carencias a la geometría de la pieza.

Por último, se le da las propiedades físicas de acero inoxidable a la pieza.

### **3.1.3 Biela Secundaria**

La biela secundaria será análoga a lo realizado en la biela principal siendo incluso más fácil de generar.

Se empieza realizando dos extrusiones desde el mismo plano de trabajo. Aquí, como en el caso anterior también conviene realizar una proyección de los planos para así utilizarlos de referencia. Sirva pues, este comentario para los demás casos, ya que situar las geometrías dentro de los bocetos resulta de vital importancia.

En primer lugar se realiza un círculo de diámetro 24 mm con su extrusión de 28 mm de forma simétrica (para así poder utilizar el plano de trabajo donde se sitúa el centro de la pieza). Posteriormente, separado desde el centro del primer círculo 178 mm se realizará otro boceto de un nuevo círculo, en este caso de 35 mm de diámetro.

El siguiente paso es crear el cuerpo de la pieza. Para ello se realizarán dos líneas paralelas entre sí separadas 18 mm la una con la otra que sean simétricas respecto al eje que separa los centros de los círculos que han sido creados (es decir, de la proyección de uno de los planos si se ha realizado la proyección de los mismos). Estas líneas deben terminar cuando toquen los círculos creados, la mejor forma de hacerlo es mediante la herramienta alargar dentro de la creación del boceto, con esto se crea un boceto al que una vez esté terminado se le realizará una extrusión de 18 mm para tener el espesor necesario.

Además para adaptar la pieza según especificaciones del plano de diseño se tendrán que hacer unos empalmes de radio 24 mm en las cuatro zonas de contacto entre los primeros círculos creados y el cuerpo de la pieza. Para ello se utiliza la opción de empalme en 3D.

Posteriormente se realizarán dos marcas en los correspondientes centros de estos círculos que se acaban de crear para que en esas marcar se practique un agujero de 15 mm de diámetro. En

el caso de la marca concéntrica del primer círculo de 24 mm y de 24 mm de diámetro para el de la marca concéntrica del círculo de 35 mm. Ambos agujeros deben de ser pasantes, ya que dentro irán los bulones (o casquillos) que permitirán el giro.

Como en el caso de la biela principal, esta también tiene un detalle en el cuerpo de la misma. Para ello se crea un boceto en una de las caras externas en el cuerpo de la pieza según las especificaciones del plano de apoyo de la web. Una vez se tenga, se realiza una extrusión y se realiza la misma operación en la otra cara de forma que la pieza quede simétrica, para ello se utiliza la herramienta simetría y se escoge la operación que se acaba de realizar.



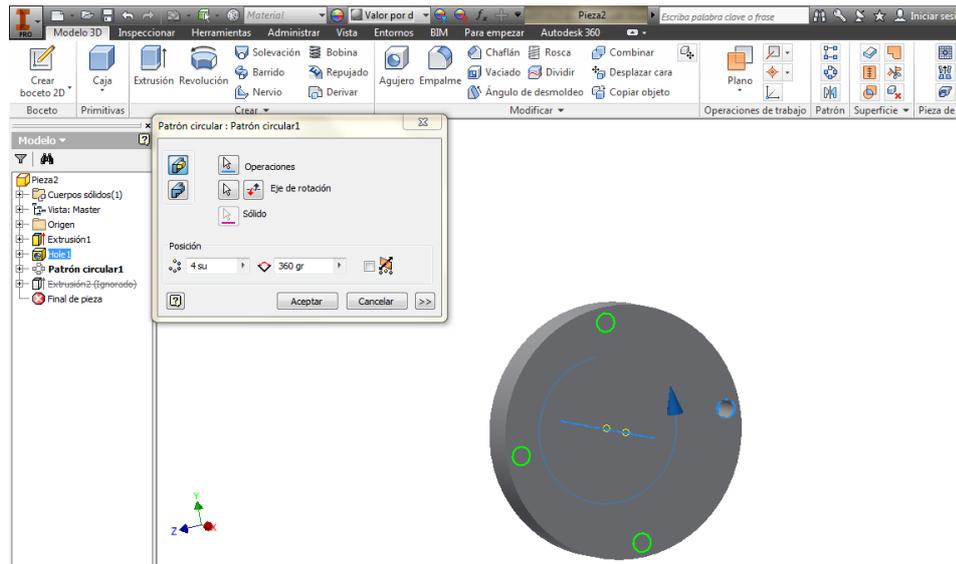
*Figura 3.1.6: Biela secundaria tras el diseño 3D*

Finalmente se obtendrá la pieza que corresponde. Como en otros casos, primero se tienen que definir las propiedades físicas de la pieza antes de dar por finalizada esta. Como en el resto de casos citados, en este, también serán las de acero inoxidable.

### 3.1.4 Cilindro

La siguiente pieza ha sido generada a partir de los requerimientos que se muestran en los elementos que hasta ahora se han ido creando. Es decir, no se han sacado de ningún manual, ni en concreto de ningún plano, simplemente se ha adaptado su forma (según el pistón, la biela y el movimiento de estos) y según los requerimientos técnicos del motor (refrigeración por aire).

El primer paso es crear una base circular de 134 mm, que después irá situada sobre el bloque motor, de espesor 10 mm (mediante extrusión). Después se realizará un círculo de construcción de 118 mm que sea concéntrico con el primer agujero de la base circular. A continuación se marcará un punto, que servirá de referencia para realizar 4 agujeros pasantes de 10 mm no roscados. Estos cuatro agujeros irán distribuidos a lo largo de los 360°. Por tanto uno de los agujeros debe de posicionarse. Para el posicionamiento se puede optar por el planteamiento más rápido (que es el que se ha escogido) y que consiste en posicionar el agujero en la misma vertical (o horizontal) que el agujero central del círculo de construcción. Una vez realizado el agujero se utiliza la herramienta de patrón circular y se selecciona el agujero realizado, como eje para el patrón se utiliza el eje que será el longitudinal de la pieza, de forma que los cuatro agujeros se creen a noventa grados uno del otro sobre la misma cara de la pieza.

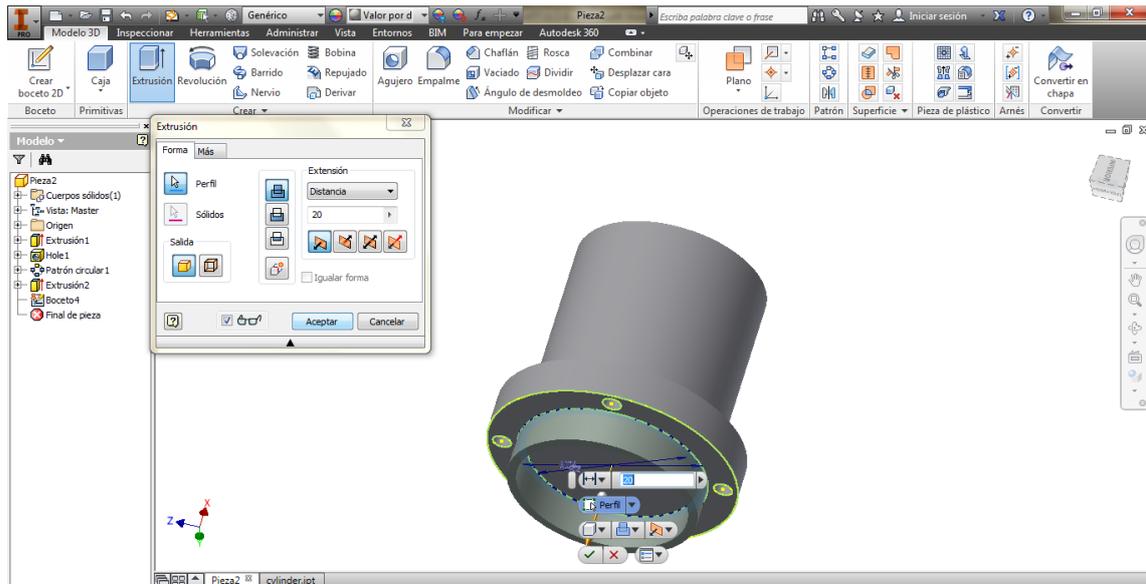


*Figura 3.1.7: Base con agujeros del cilindro*

El siguiente paso es crear lo que será el cuerpo del cilindro donde realizará el movimiento de translación vertical el pistón. Para ello se realiza sobre una de las caras de la base un círculo de 102 mm de diámetro (dado que el pistón es de 92 mm el cilindro tendrá un espesor de camisa de 5 mm, suficiente para transmitir bien el calor que se genere en su interior con la combustión).

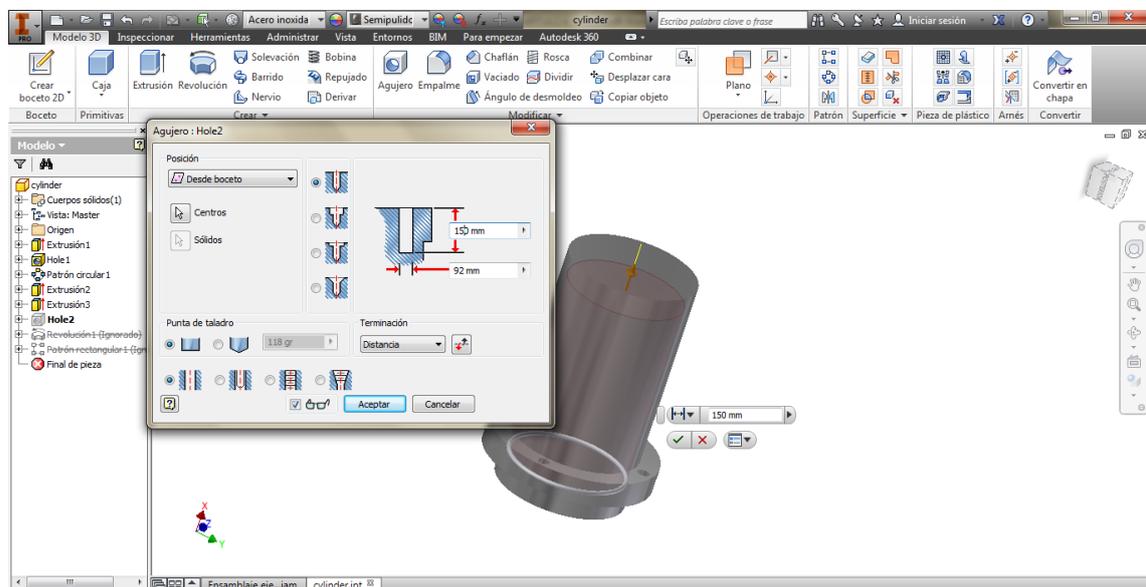
La altura de la extrusión (altura por tanto del cilindro) es de 150 mm, altura que será suficiente, dimensionalmente, como para albergar el pistón y la biela en el punto muerto superior (PMS).

Dado este movimiento, se considera la generación de una pequeña parte del mismo cilindro que se adentrará en el bloque motor. La base de 20 mm que se crea da estabilidad estructural al sistema para evitar que todo el peso del cilindro esté por encima de la base a la que irá atornillada. De esta forma se baja el centro de gravedad de la pieza.



**Figura 3.1.8:** La base de 20 mm que se crea da estabilidad estructural al sistema

Después se realiza un agujero ciego de profundidad 150 mm (medidos desde la cara inferior de la primera base circular creada) y de diámetro 92 mm para que por dentro realice el pistón su recorrido. Se debe de indicar para aclarar que se dejan por arriba aún 20 mm de material que no se van a perforar ya que aquí es donde irían situadas, la bujía y las válvulas de inyección y escape, pero estos elementos quedan fuera del caso de estudio.



**Figura 3.1.9:** El agujero de 92 mm de diámetro se realiza para que el pistón pueda moverse por su interior

Finalmente, para dotar de refrigeración al conjunto motor se realizan 25 aletas en forma de voladizo de 2.5 mm de altura y 9 mm de largo (medidos desde la pared exterior del cilindro). Entre una aleta y la siguiente se dejará una distancia de 2,5 mm. Para mejorar el boceto se puede,

mediante activación del botón del teclado F7, mostrar el plano de corte de forma que se vea mejor lo que se está representando.

Se realiza una revolución en el eje longitudinal de la pieza y mediante la herramienta de patrón rectangular se construyen las demás aletas hasta tener las 25. Finalmente se le dan las mismas propiedades físicas que en los casos anteriores.

De esa forma se obtiene la pieza que se buscaba:



*Figura 3.1.10: Cilindro aleteado para un motor radial*

### **3.1.5 Casquillo Superior de la Biela Secundaria**

En este caso se realiza un boceto en el que se dibujan dos círculos concéntricos de 24 mm y 22 mm y se realiza una extrusión del área que hay entre los dos círculos de forma que se obtiene la figura que se busca. Como nota, remarcar que, esta operación podría haberse realizado mediante la extrusión, en primer lugar del cilindro creado por el diámetro de mayor dimensión y después, sobre la cara donde se quiera realizar el agujero, se practicaría una marca que después serviría de referencia para la operación de agujero. Como es obvio, debido a la simplicidad de esta pieza, se ha optado por un proceso más rápido mediante la extrusión practicada de la zona común a los dos diámetros.

Como en el resto de casos, se le da las propiedades físicas del acero de inoxidable.

### **3.1.6 Casquillo Inferior de la Biela Secundaria**

Análogamente se creará este casquillo pero con diferentes dimensiones. En este caso los círculos del boceto serán de 15 mm y 12 mm. Como en el resto de casos, se da por terminada la pieza una vez se le aplican las propiedades físicas.

### **3.1.7 Eje Principal**

En este caso para la creación del eje se ha escogido la opción de realizarlo desde un boceto, aunque existe la posibilidad de hacerlo mediante la opción *Ejes* una vez se esté dentro del archivo de montaje con la extensión “.iam”.

Para empezar con el eje se ha escogido un diámetro de 46 mm que se extruye 50 mm. Posteriormente se dibuja sobre la cara que se acaba de crear otro boceto, ahora el círculo es de 52 mm y se extruye 25 mm para evitar contactos entre piezas una vez estén ensamblados. El siguiente tramo del eje tendrá un diámetro de 46 mm de nuevo y ocupará 70 mm (en esta parte es donde se alojará la biela principal). Después, y para evitar que no se mueva de su posición la biela, se hará una pequeña hendidura en el que se reducirá el diámetro de 46 mm a 43 mm y su longitud será de solamente 3 mm, lo que marca las dimensiones de una arandela que aquí se situará durante el ensamblaje. Por último, el tramo final de la pieza será de 20 mm y volverá a tener el mismo diámetro que el inicial, es decir, 46 mm.

Además para poder tener bien sujeto al volante de inercia se le practicará un agujero pasante no roscado de diámetro 8 mm situado a 10 mm desde la parte que tiene diámetro 52 mm para que de esa forma cuando se ensamble con el volante de inercia no pueda escaparse, pues en este agujero se pondrá un bulón que se importará desde el centro de contenido del programa.

Para finalizar esta pieza, comentar que para evitar la pérdida del lector durante este proceso de creación mediante tantas imágenes y dado que es un proceso que, con anterioridad, se ha realizado se evitará poner una imagen más del resultado ya que puede resultar aburrido durante el seguimiento de este trabajo final de grado.

### **3.1.8 Casquillo Inferior de la Biela Principal**

Como en los casos anteriores, aunque en este caso, de mayor diámetro (46 mm y 52 mm respectivamente), el procedimiento es equivalente. Al final se obtiene con un boceto y su extrusión.

### **3.1.9 Pasador**

Para esta pieza se va a realizar primero lo que será la cabeza del pasador mediante un círculo, de 15 mm al que se le practica una extrusión de 7 mm. Posteriormente se realiza una extrusión de un círculo de 10 mm, que sea concéntrico al anterior, de 43 mm para obtener la longitud apropiada. Como en el resto de casos se le aplican las propiedades físicas al material y ya está terminada la pieza. Como nota para esta pieza, indicar que el plano de apoyo de la web está representado en el sistema americano, por tanto puede dar lugar a confusión si la cabeza del pasador, tiene o no, agujero. Tras pensarlo, es razonable que no puede tener un agujero en esta parte sino se estaría considerando que se sujeta por una pequeña superficie (parte común entre diámetros de 10 mm y 15 mm lo que resulta posible, pero carecería de sentido por no tener casi contacto entre superficies la pieza). Con esto se concluye que no tiene agujero el pasador.

### 3.1.10 Tacos del Perno del Pistón

Los pines o tacos son los que se encargarán de que el casquillo que une la biela con el pistón no se salga de su posición. Para su diseño en 3D se empieza por un círculo de 11 mm de diámetro al que después se le realiza una extrusión de 12 mm. Para realizar la cabeza se realiza otro círculo de diámetro 22 mm al que después se le practica una extrusión de 3 mm y que finalmente tendrá un empalme en 3D de radio 2 mm para conseguir las especificaciones indicadas.

### 3.1.11 Anillos del Pistón

Estas arandelas como se ha explicado en la parte del diseño del pistón sirven tanto para realizar funciones de estanqueidad (las arandelas superiores al eje biela-pistón) como para realizar labores de limpieza (si están por debajo del eje de la biela-pistón) de restos de aceite durante el movimiento de bajada del pistón.

Para el diseño de estos en 3D se ha realizado el camino de realizar primero un boceto con la dimensión de la arandela (radio 46 mm) extruir y posteriormente eliminar mediante una extrusión negativa o de corte un círculo de radio 42 mm. Otra forma, tal vez más rápida hubiese sido crear primero los dos círculos y solamente realizar una extrusión del área comprendida entre ambos círculos operación que en otras ocasiones se ha explicado durante este capítulo. Pese a eso, y por la escasa pérdida de tiempo para este caso, se ha optado por la primera. Como recomendación, es mejor situar la pieza en uno de los planos y el centro de los círculos en el punto donde se cruzan los 3 planos, ya que después se sitúa un plano en el borde de la pieza (mediante desfase de plano) para realizar una pequeña entalladura que sirve para facilitar el proceso de quitar y poner la arandela del pistón. Esta entalladura será de 1 mm de ancho y estará hecha a 45 grados (o 135 grados depende desde dónde se mire) del centro de las dos caras, viendo la pieza de canto. Para terminar, a esa entalladura se le realiza una extrusión que atraviesa las dos caras (lo mejor resulta ser utilizar la opción “hasta” y marcar la cara interior de la arandela). Una vez se termina la operación de extrusión la pieza solo tiene que recibir las propiedades físicas y queda completamente terminada.

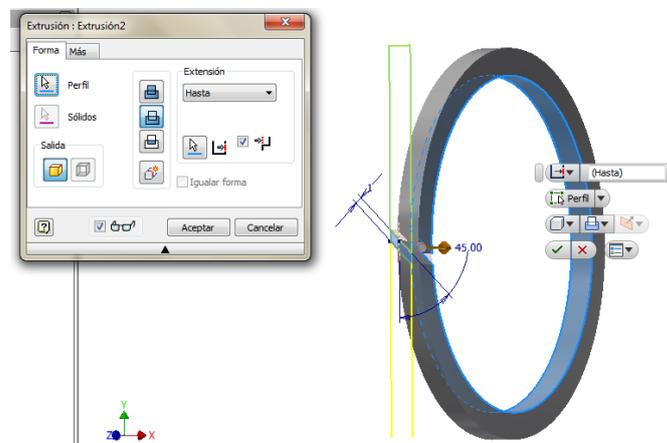


Figura 3.1.11: Extrusión de la hendidura

### **3.1.12 Casquillo del Pistón**

Para este caso, se realiza como los anteriores casquillos hechos hasta el momento. En este caso los diámetros son de 22 mm el exterior y el interior de 11 mm y la extrusión será de 80 mm de altura.

### **3.1.13 Bloque Motor**

El bloque motor conforma el lugar donde se ensamblarán todas las piezas del motor. Para este caso, el motor radial de cinco cilindros, se ha elegido un pentágono al que se le ha realizado una extrusión de 372 mm, que está vacío en su interior y solamente tiene, en una de las caras un agujero de 46 mm de diámetro centrado en el eje de esa cara por donde, en el funcionamiento del motor, saldría el eje principal del mismo. El espesor que se ha decidido es de 20 mm de canto (valor que se considera suficiente para albergar el resto de piezas y dar cierta estabilidad estructural) por tanto mediante vaciado se puede realizar este paso. Para poder alojar los 5 cilindros se ha realizado 4 agujeros roscados cuya designación es de métrica 10 mm y 1.5mm de avance. Para su creación se ha realizado un círculo concéntrico de 118 mm de diámetro centrado en las caras rectangulares del pentágono (en el centro geométrico de esas caras). Estos agujeros están distribuidos a lo largo de 360°. Cabe decir que los agujeros no se han roscado hasta la totalidad, es decir, el agujero de métrica 10 mm solamente llega a 10 mm aunque el agujero tiene una profundidad de 15 mm.

Finalmente, para que puedan moverse los pistones en su interior se ha realizado un agujero de 102 mm de diámetro (ya que los cilindros se adentran en el bloque motor como se explicó cuando se estaban diseñando estos). Finalmente, mediante la operación de patrón circular, se copia esta forma a lo largo de las otras caras del pentágono.

### **3.1.14 Volante de Inercia**

El volante de inercia, contrapeso o cigüeñal es una parte fundamental en los motores ya que sirve como pulmón para continuar con el movimiento de inercia del motor que generan los pistones durante su carrera de bajada (valga la redundancia).

En primer lugar se crea el boceto que tendrá las dimensiones y forma del volante de inercia, el principal punto que se tiene que considerar es que los ejes son de 46 mm cada uno por tanto va a marcar la forma del mismo. Para este contrapeso se ha decidido (por motu propio y adaptándolo a las especificaciones tomadas con anterioridad) que los ejes estén separados una distancia de 50 mm entre ellos y, como es lógico, que los centros de los agujeros estén en la misma vertical. Además, el agujero superior se ha posicionado a 33 mm del borde superior de la pieza. Por lo que representa a los extremos, paralelos del cuerpo de la pieza que distan 66 mm entre ellos mismos, tienen una longitud de 130 mm desde el borde superior y finalizan en dos rectas simétricas

respecto al eje que pasa por el eje de simetría de la pieza que conforman los centros de los agujeros de los ejes. Estas dos rectas estarán separadas  $150^\circ$  entre sí.

El espesor, conseguido mediante una extrusión simétrica del primer boceto, es de 20 mm. Para dotar de forma circular a la parte inferior se ha realizado un círculo de 110 mm centrado en un punto que se sitúa a 113 mm del borde superior

Por último para mejorar la apariencia se ha realizado un empalme en 3D en las aristas de radio 10 mm. Además para favorecer el trabajo de esta pieza se reduce en la parte interior la masa para alejar el centro de gravedad de la pieza. A este volante de inercia se le realizarán dos agujeros a cada lateral que cortará perpendicularmente a los agujeros donde irán alojados los ejes en la parte superior para poder introducir los bulones que sostendrán esta pieza con el eje principal y el eje del motor. Los agujeros pasantes serán de 8 mm de diámetro y se sitúan, el primero a 33 mm del borde superior, y el inferior, a 50 mm del agujero superior.

Como recapitulación de este apartado se muestra a continuación una tabla con las piezas que se han ido modelando y su resultado.

*Tabla 3.1.1: Total de piezas modeladas que integran el motor radial*

		
<b>Pistón</b>	<b>Biela Principal</b>	<b>Biela Secundaria</b>
		
<b>Cilindro</b>	<b>Casquillo Sup. Biela Secundaria</b>	<b>Casquillo Inf. Biela Secundaria</b>
		
<b>Eje Principal</b>	<b>Casquillo Inf. Biela Principal</b>	<b>Pasador</b>

		
<b>Tacos del Perno del Pistón</b>	<b>Anillo del Pistón</b>	<b>Casquillo del Pistón</b>
		
<b>Bloque Motor</b>	<b>Volante de Inercia</b>	

## 3.2 Restricciones de ensamblaje del modelo 3D

A continuación se realizará el ensamblaje de las piezas que se han ido creando de forma que se obtenga un conjunto. Este conjunto es el que posteriormente se utilizará para simular mecánicamente en el siguiente capítulo. Por tanto las restricciones de movimientos son realmente importantes.

Para ello se abre un nuevo archivo, en este caso la opción será “Normal.iam”. Una vez se abra el nuevo documento se van importando las piezas que se han estado creando mediante clic en *Insertar* y se selecciona las piezas que se quieren ir ensamblando.

Como recomendación, es mejor insertar el bloque motor y centrarlo en el eje de coordenadas, a partir de aquí se insertarán las demás piezas.

### 3.2.1 Ensamblaje Radial del Motor

En este caso de estudio se empezará por el bloque motor que se fijará en el origen de coordenadas para poder utilizar después los planos del origen como referencias. Es recomendable cambiar el color de algún componente para ir viendo que los componentes quedan bien ensamblados. Para cambiar el color, en la parte de arriba de la pantalla, aparece un círculo cromático, una vez se seleccionan las piezas a las que se quiere que afecte el cambio de color se pulsa sobre este círculo y se selecciona el que más guste.

Como se ha comentado ya en este capítulo, los ejes se pueden crear a partir de bocetos o directamente desde un archivo con la extensión .iam.

En esta ocasión se creará de esta forma. Para ello se abre un nuevo documento con esa extensión, y se pulsa sobre el botón ejes dentro del submenú *Diseño* de la parte superior.

Se crearán cinco tramos. El primero, de longitud 17 mm y diámetro 46 mm, el segundo, de longitud 3 mm y diámetro 43 mm (este será el que se utilizará como hendidura para evitar que el eje motor se salga), otro de 20 mm de longitud y diámetro 46 mm. En esta cara se realizará después un boceto de un punto de referencia para realizar un agujero pasante de 8 mm de diámetro que se utilizará para unir el volante de inercia con este eje. El siguiente tramo es una sección de ensanche de 52 mm de diámetro que impedirá que el contrapeso que irá hasta aquí pueda salirse de su posición, y finalmente, un tramo de 46 mm de diámetro y de longitud 106 mm que apoyará en el bloque motor.

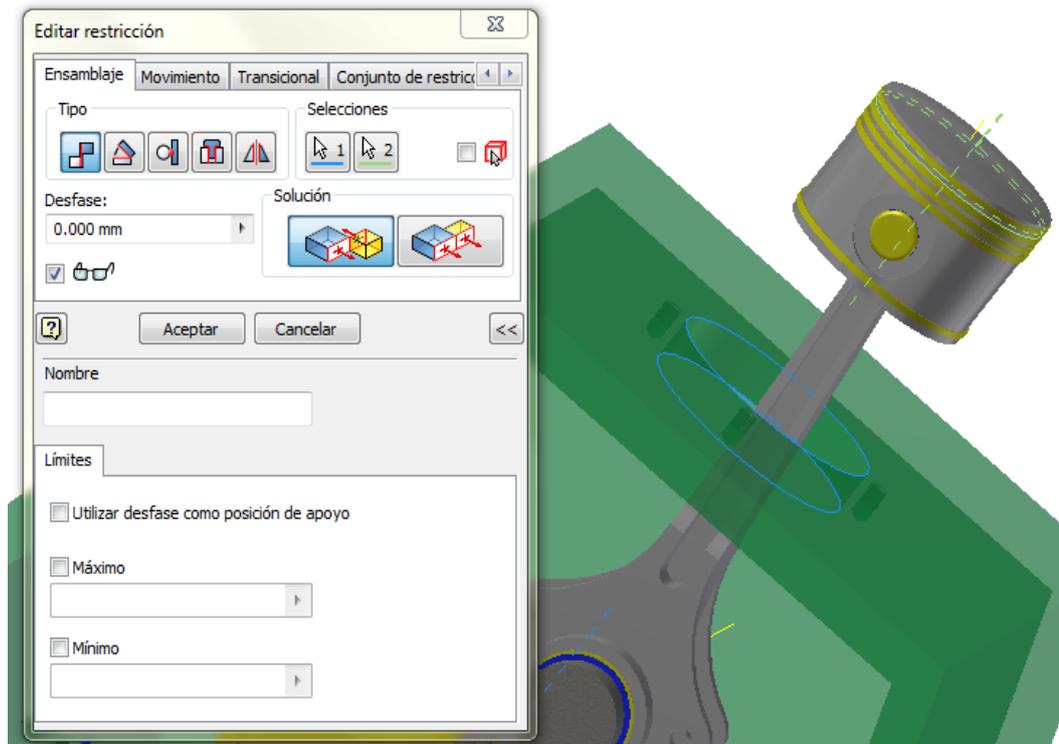
Como nota, mencionar que Inventor también ofrece una herramienta muy interesante para diseño acelerado de elementos de transmisión de potencia y movimiento, llamada Design Accelerator pero durante este trabajo académico no ha sido utilizado.

Este eje tendrá un agujero en una de sus caras que servirá para posicionar el bulón que sostendrá el volante de inercia al eje motor. Para realizar el agujero en la posición exacta lo mejor es realizar un desfase de plano y situar el plano de trabajo sobre la cara exterior, es decir un desfase de 23 mm ya que el diámetro del eje es de 46 mm en el lugar donde se quiere realizar el agujero.

Al eje motor que se acaba de crear se restringe su eje X con el eje X del origen de esta forma se resta un grado de libertad, ahora solamente el eje motor puede trasladarse por este eje X y girar.

A continuación se añade la biela principal al eje principal y se restringe mediante la tipología insertar que restringe los ejes para permitir que una pieza pueda girar respecto de la otra y además hace coincidentes dos aristas. Para evitar que se salga del eje se utiliza el anillo del eje que se había creado en la fase anterior. Al lado contrario del eje se sitúa el volante de inercia o contra peso de la misma forma. Además se le introducirán dos bulones desde el centro de contenido del programa. En este caso, y debido a la geometría se ha optado por utilizar dos bulones DIN EN ISO 8750 de 8x50 mm. En el agujero inferior, viendo la pieza de forma que se tenga la parte de mayor masa del volante de inercia en la parte inferior, se sitúa el eje motor. De la misma forma que se había hecho se restringe el movimiento del eje motor y del volante de inercia mediante otra arandela igual que la anterior.

El siguiente paso es restringir los pistones en el interior de los agujeros del bloque motor mediante la restricción de tipo coincidencia. Pero primero es recomendable situar las arandelas del pistón en las distintas hendiduras realizadas sobre el mismo durante su diseño 3D. Una vez se compruebe que el resultado es el que se quiere obtener se aplica la restricción y se pasa al siguiente anillo. En este caso el proceso se repite tantas veces como arandelas se tenga. En el caso de estudio se repite el movimiento 5 veces.



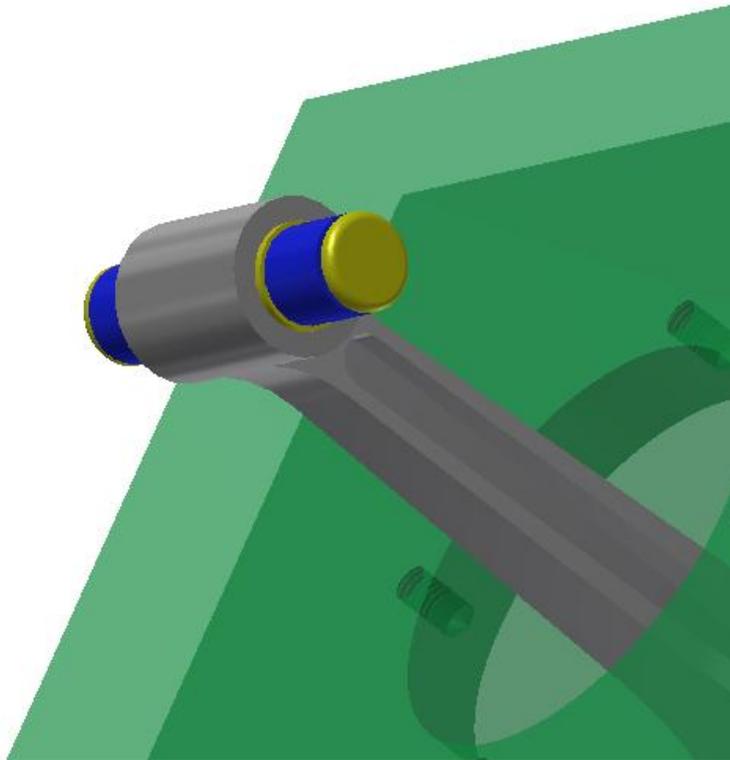
**Figura 3.2.1:** Mediante la operación de restricción de tipo coincidencia el pistón solo puede moverse por el interior del agujero en el bloque motor

Finalmente se obtiene que los anillos del pistón solo puedan girar dentro de las hendiduras pero no pueden salirse.

El casquillo del pistón debe quedar restringido, ya que es donde irá la biela sujeta. Para ello se inserta el casquillo y se restringe mediante la opción de ensamblaje del tipo coincidencia. Conviene posicionar correctamente el casquillo respecto el eje del agujero lateral del pistón, para ello se utiliza la opción coincidencia de ambos ejes.

Los tacos de los pernos serán los que evitarán que visualmente se pueda salir el casquillo del pistón del propio pistón, aunque es imposible que esto suceda tras las dos operaciones que se acaban de realizar. Para ello se introducen en el eje del agujero lateral del pistón, después, se limitan la cara interior del taco con la cara exterior del agujero del pistón, así quedan completamente restringidas.

Una vez ya han sido los pistones correctamente preparados ya se puede restringir su movimiento con el de las bielas. En la parte superior se tendrán que situar los diferentes casquillos, según sea para la parte superior o inferior mediante una restricción del tipo insertar. Además en todos los pistones habrá un casquillo del pistón y un casquillo superior para la biela y se tienen que poner ambos.



*Figura 3.2.2: Ensamblaje entre el casquillo del pistón y el casquillo sup. de la biela principal*

Cabe recordar que habrá una biela principal y otras cuatro que serán secundarias, así que estos pasos se tienen que repetir en cada uno de los pistones y sus correspondientes bielas. Además las bielas secundarias se tendrán que alojar dentro de los orificios que tiene la geometría de la biela principal, y mediante los pasadores, se evitará que estos se salgan de la posición correspondiente.

Cuando todo esto se haya realizado, de los dos movimientos que tiene el sistema (giro y translación) se tendrá que restringir uno, pues el giro del eje motor es el único que debe de ser el que permita el movimiento. Para ello se hacen coincidir el plano de la cara del eje motor con un plano que se crea a partir del desfase del plano que corta transversalmente los agujeros del bloque motor y por tanto parte el bloque motor en dos mitades casi simétricas (a excepción de la cara que tiene un agujero que hace que no sea simétrico el bloque motor completamente). El desfase de este plano se hace a 40 mm en dirección a la cara del bloque motor que tiene el agujero del eje motor. De esta forma se puede comprobar que el movimiento de todo el ensamblaje del motor radial únicamente está regido por el giro del propio eje motor, que es donde se quería llegar.

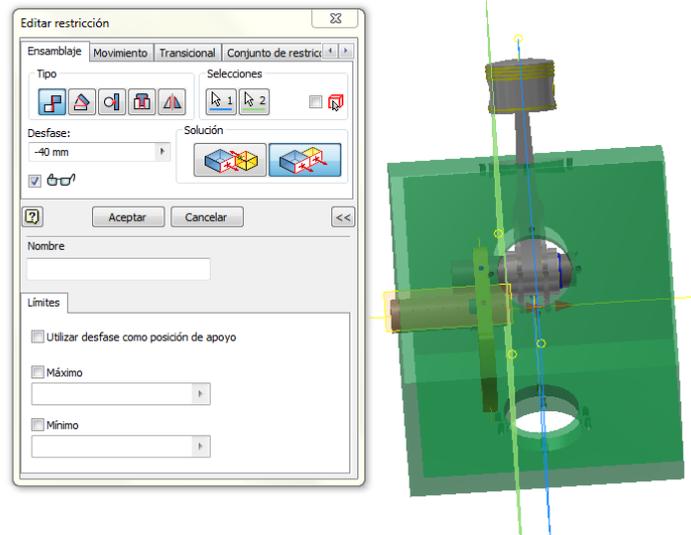


Figura 3.2.3: Restricción de la translación del eje

Finalmente queda añadir los cilindros que se alojarán en los agujeros que tiene el bloque motor, para evitar que se salgan se utilizarán tornillos del centro de contenido del programa. Estos tornillos darán fijación al cilindro sobre la estructura del motor. Para ello se utiliza la base de piezas que tiene Autodesk Inventor mediante: *Insertar, Desde el centro de contenido* y se busca el tipo de tornillo que se necesite. En este caso se utilizarán 4 tornillos por cilindro del tipo DIN EN ISO 1207, un tornillo comercial de métrica 10 y longitud nominal de 30 mm ya que la base del cilindro tiene un espesor de 20 mm y el agujero roscado del bloque motor tiene un espesor de 10 mm. Para poder mostrarlo una vez dentro del centro de contenido buscaremos en el submenú *Fijaciones, Pernos, Cabeza de Boquilla* y se selecciona dicho tipo. Luego se clicca en la pantalla de ensamblaje tantas veces como se quiera, en este caso solamente una, ya que se hará mediante la operación patrón circular, por tanto solo hace falta ensamblar uno de los pernos y luego con patrón circular seleccionando el eje perpendicular al cilindro de forma que quedarán a 72 grados uno del otro. Del mismo modo se pueden realizar los otros 4 cilindros que faltan por posicionar. Eso sí, no es recomendable hacer lo mismo con los distintos pistones ya que esto implica que se muevan de la misma forma, lo que no es cierto, se estaría considerando que todos los cilindros estarían en la misma fase dentro del proceso de combustión, y eso sería, lógicamente falso.

Tras la restricción de movimientos se obtiene el conjunto correctamente ensamblado.

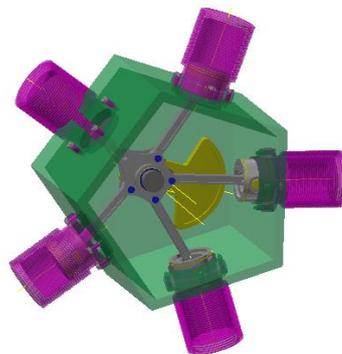


Figura 3.2.4: Conjunto del motor radial completo restringido

Como se puede observar, una recomendación que, aunque ya hecha merece ser otra vez mencionada, conviene recordar que al dotar de color a las distintas piezas se observa mejor el resultado del ensamblaje. Además de poder dotar de mayor o menor transparencia a las piezas. Para mostrar, como es este caso, el resultado final del conjunto. En el caso de no aplicar la transparencia a los cilindros, el movimiento que tienen los pistones en su interior no podría verse.

Una vez terminado el conjunto ya está preparado para simularlo mecánicamente. Aunque para el caso de estudio solamente se simulará la biela principal con su pistón y cilindro correspondiente, pues será la biela principal la que se analizará durante el capítulo 5.



# **CAPÍTULO 4: Simulación mecánica del motor radial con Autodesk Inventor Professional 2014**

4.1	Simulación con Inventor .....	42
4.2	Análisis de Resultados .....	44



La simulación mecánica de componentes permite realizar una aproximación a la realidad física en el proceso de diseño en ingeniería. En el mercado se pueden realizar pruebas con software de muchas compañías, entre ellas ADAMS de la casa MSC Software o Ansys, otro programa conocido en el mundo ingenieril. Estos programas se podrían utilizar con igual finalidad (conservando las extensiones de archivos y analizando si existen limitaciones entre diferente software, como es lógico), pero en este caso, se va a utilizar la herramienta que se ha estado utilizando hasta el momento para el diseño 3D de piezas, el Autodesk Inventor Professional 2014 junto con su herramienta Dynamic Simulation.

En este caso, el motor radial de cinco cilindros, como caso de estudio, se someterá a la simulación mecánica, y para ello se adaptará las condiciones necesarias para llegar a un proceso habitual de funcionamiento. En este capítulo se aborda pues el problema en una de sus partes, aislando la biela principal junto con el eje al que va unido, para abordar el problema de diseño en el que se determinará el tiempo que tarda el motor en alcanzar las 2175 rpm, ya que estos motores, como se ha comentado en capítulos anteriores, alcanzan máxima potencia alrededor a las 2000-2500 rpm [3]. Finalmente como punto de culminación de este capítulo se mostrarán las reacciones que actúan sobre la biela, ya que está será la que se analizará en el siguiente capítulo, pues después de un diseño inicial podría darse el caso de que las dimensiones y/o el material no fuesen apropiados para la aplicación y sus necesidades. Así pues, las restricciones realizadas durante el montaje en el capítulo anterior realizan ahora un papel principal en la determinación de las reacciones.

Durante este capítulo, la metodología que se va a utilizar es la siguiente:

- 1) Se crearán las uniones.
  - a) Se convertirá automáticamente las uniones estándar y las giratorias
  - b) Se iniciará todas las posiciones de las uniones a 0 (posición de partida)
  
- 2) Se crearán las restricciones de entorno.
  - c) Se aplicarán las fuerzas exteriores
  - d) Se utilizará un gráfico de entrada para establecer las premisas lógicas
  
- 3) Se analizarán los resultados.
  - e) Se determinará el tiempo del motor en alcanzar la potencia máxima (2175 rpm)

Antes de empezar se realizan unos pequeños cálculos que servirán para determinar las fuerzas que se aplican sobre el pistón de la biela principal.

- La máxima presión de combustible es de 90 bares o  $9 \text{ N/mm}^2$ , aunque este dato puede variar significativamente según combustible y tipo de inyectores. ( Dato que se toma como hipótesis de partida suponiendo que se utiliza las mismas características del combustible que el que se utiliza en el motor de *Triple Eight* [5].)
  
- La sección del cabezal del pistón para el caso de estudio es de:  
92 mm de diámetro del pistón,  $6647.6 \text{ mm}^2$  de Área.

Por tanto la fuerza máxima:

$$F = S \text{ (mm}^2\text{)} \cdot P \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (4.1)$$

Siendo  $S$  la sección del pistón calculada y  $P$  la presión máxima del combustible, es de 59828 N, o lo que es lo mismo, 59.8 KN.

Dado que el pistón no recibe esta fuerza continuamente, solamente durante el proceso de inyección del combustible. Y dado que si se utilizase este valor la fuerza aplicada haría que se llegara a la velocidad del eje que se requiere (2175 rpm) antes de lo real, se aplicará solamente el 50% de esta fuerza máxima debida a la presión en la inyección del combustible para intentar acotar algunas de las variables intrínsecas del modelo. Es decir, el problema ahora es, determinar cuánto tiempo tardaría el motor en conseguir la máxima potencia utilizando solamente una fuerza motriz del 50% (29900 N) de la fuerza debida a la presión del combustible.

## 4.1 Simulación con Inventor

El primer paso es abrir el documento del ensamblaje del eje motor con el cilindro, en su extensión “.iam”. Una vez abierto se selecciona la opción *Entornos > Simulación Mecánica* y se selecciona la opción de *Configuración de la Simulación*. Después, se marca la casilla de *Convertir automáticamente las restricciones en uniones estándar* y se clicca sobre el botón de *todas las posiciones a cero*. De esta forma se obliga a que todas las posiciones estén en el reposo (o posición de inicio). Como recomendación, se puede orientar la posición de alguna de las partes, como puede ser la posición del volante de inercia, para ver cómo evoluciona el conjunto, la otra opción es mover primero la pieza hasta la posición que se desee como inicial, y luego entrar en el menú de *Entornos*. Dentro de este menú es donde se muestra la opción de analizar con Ansys (es decir, crea la opción del archivo post-tratamiento con este programa, por si se quiere utilizar, pero en este caso no se va a usar).

Antes de cerrar esta ventana conviene marcar la pestaña de utilizar la velocidad angular en rpm y luego aplicar, para ello primero se despliega la opción de “>>”, ya que si no se marca, las posiciones angulares se marcarán en ángulos por segundo, lo que no es del todo intuitivo considerando que se trata de la rotación de un eje motor.

El programa da la opción de visualizar el estado del mecanismo y las redundancias que este pueda tener. Pese a esto, puede darse el caso que haya restricciones que el programa entienda como redundantes y que físicamente no lo sean. Como por ejemplo que alguna restricción el programa la entienda como repetida pero en cambio, si no existiera, el conjunto no tendría estabilidad física. En este caso de estudio, el mecanismo está sobre restringido según el programa, ya que el casquillo del pistón y el casquillo superior de la biela tienen una restricción de coincidencia entre sus ejes, además el casquillo del pistón es coincidente con el agujero de 22 mm de diámetro horizontal que va de parte a parte del pistón y el casquillo superior de la biela está alojado en el agujero superior de la biela. Con estas restricciones obviamente no puede haber ningún movimiento entre los elementos, pero si no estuviesen el pistón no se sostendría en la cabeza superior de la biela, por tanto aunque es redundante es necesario que estén todas las restricciones.

A partir de ahora se tienen que definir las restricciones de entorno. Se aplicará pues una fuerza sobre la cabeza del pistón para simular y controlar el efecto de la explosión de la mezcla en la cámara de combustión hasta que el motor alcance las 2175 rpm.

Se clicca sobre la opción *Fuerza* arriba en el panel y como ubicación un punto cualquiera de la cabeza del pistón. Como dirección, el eje del pistón. Debido a que marca la flecha hacia arriba, se cambia la dirección para modificarla correctamente y que salga en la contraria. En magnitud se pondrá, como se había comentado, el 50% de la fuerza calculada, es decir, 29900 N. Si se marca el valor como fijo tendrá ese valor durante toda la simulación, lo que no es del todo cierto, ya que solamente se aplica la fuerza durante la bajada del pistón, es decir en la carrera del mismo. Entonces se introduce el valor pero desde la opción gráfico de entrada para que grafique esta fuerza, en el instante  $x_0=0s$  será  $y_1=29900$  N y en  $x_1=0.2s$   $y_2=0$ N. Es decir, se representa una recta decreciente. Además la aplicación de esta fuerza irá condicionada ya que solamente se debe aplicar la carga durante la fase de explosión dentro del proceso de combustión del cilindro.

Los pares cinemáticos que se van a tener en cuenta son: el cilíndrico existente entre el bloque motor y el pistón. Y la unión cinemática entre el bloque motor y el grupo formado por el casquillo de la biela principal, el eje principal, el volante de inercia y el eje motor. El primer par es cilíndrico, por tanto tiene dos movimientos, uno de rotación, que el programa denomina con un 1 y otro de translación al que el programa denomina con un 2. El segundo par comentado es un par de revolución y por tanto solamente tiene un grado de libertad y es la rotación y la denomina con otro 1. Así pues, las variables que van a condicionar la aplicación de la fuerza debida a la presión del combustible, van a ser la velocidad del par cilíndrico en su movimiento de translación, que debe de ser inferior o igual que 0 mm/s, es decir, solamente se aplica la fuerza a partir del PMS. Y, la velocidad de rotación del segundo par, que debe de ser menor que 2175 rpm (aquí es donde se aplica el uso de la velocidad radial en revoluciones por minuto que se había marcado anteriormente) ya que si esta condición no se tuviese en cuenta, la aplicación de la fuerza y el volante de inercia harían que el conjunto se acelerara de forma perpetua, ya que no existe rozamiento (es una de las hipótesis de partida que se van a tomar).

Para graficar la salida y su evolución se marca la opción y en *Escala* se introduce el valor 0.00001. Con esto se mostrará una flecha del color que se escoja, la distancia de la cual, guardará la escala que se haya elegido con la magnitud de la fuerza aplicada.

Finalmente se fija el tiempo final de la simulación en 0.067 s. Este valor ha sido comprobado tras varias pruebas para ver exactamente un ciclo entero del movimiento del pistón con todas sus fases, desde la explosión (instante en que se aplicará la fuerza sobre la cabeza del pistón), pasando por el proceso de escape (visualmente se ve que el pistón vuelve a subir por su propio movimiento, y si se tuviesen válvulas, la válvula de escape debería abrirse en este instante de tiempo), y finalmente el pistón vuelve a bajar y vuelve a subir llegando al punto de partida. La imagen puede incrementarse a partir del valor que el programa determina según el tiempo de simulación, pero simplemente lo que proporciona es un mayor detalle de la simulación, es decir, más pasos por segundo. Tras este paso, ya se puede dar al inicio de la simulación y ver cómo actúa el conjunto motor.

## 4.2 Análisis de Resultados

Una vez ya se ha simulado el siguiente paso es analizar los resultados para ver si se han adaptado a los requerimientos que se buscaban. Para ello el programa ofrece la opción del gráfico de salida. En esta opción se pueden representar todas las variables de cada una de las uniones. Para ver si el funcionamiento del conjunto está dentro de lo esperado, conviene graficar, de forma separada, la fuerza externa aplicada sobre el pistón, la velocidad y posición del par cilíndrico, y la velocidad de revolución del eje motor, para así visualizar si se han tomado correctamente las condiciones de aplicación de la fuerza y en caso de que no lo fueran, modificarlas con cierto criterio.

Como nota se tiene que considerar que para convertir de rpm a gr/s que es la unidad en la que representa la velocidad angular, pese a marcar la opción previamente, solamente hace falta multiplicar por 6 el valor de las revoluciones por minuto para obtener los grados por segundo. Por tanto, 2175 rpm corresponden a 13050 gr/s. Se busca este valor en el gráfico correspondiente a la velocidad del eje y se puede observar como la fuerza aplicada sobre el pistón en ese instante decrece bruscamente, es decir, las condiciones de aplicación han hecho que el motor se limite a funcionar hasta que se alcancen las 2175 rpm, luego se hacen perpetuas debido a que no hay fricción, es decir no hay rozamiento (dado que no se han estado considerando estas fuerzas que, fuera de un estado ideal sí deben de considerarse).

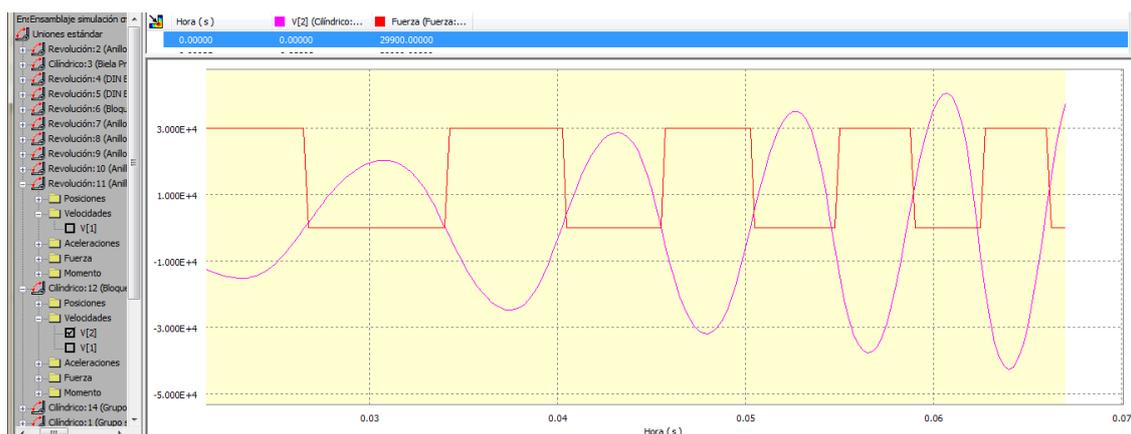


**Figura 4.2.1:** En la parte superior, la fuerza aplicada sobre la cabeza del pistón. En el centro, la velocidad de revolución del eje motor que se limita a 2175 rpm en las condiciones (13050 grados/s). Y en la parte de abajo, el movimiento oscilatorio del pistón.

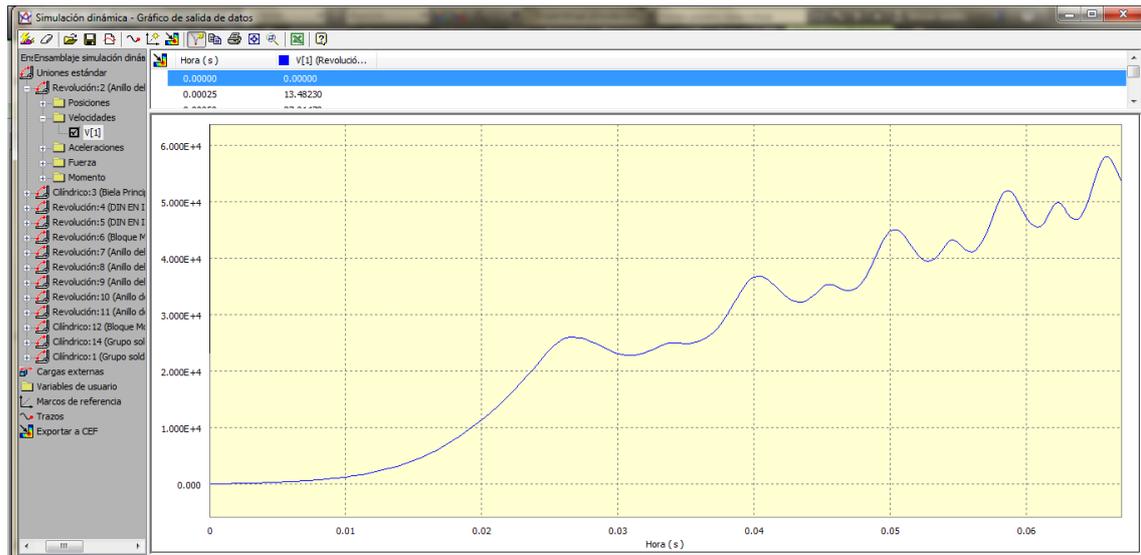
Con esto, solamente falta obtener el tiempo que ha tardado el motor en conseguir esa velocidad de rotación del eje. En este caso y con el valor de la fuerza aplicada, el motor solamente ha tardado 0.01925 segundos. Es decir, el motor pasa de 0 rpm en estado de reposo a la velocidad punta en unas centésimas de segundo.

Como curiosidad se puede modificar las condiciones de aplicación de la fuerza sobre el pistón. Hasta conseguir este escenario final, se propuso que la posición del pistón fuese quien decidiera cuándo aplicar o cuándo no la carga, pero el programa no considera tales efectos, ya que una buena acotación del instante de actuación de la fuerza del pistón, hubiese sido que esta solamente se produjera una vez el pistón estuviera en el PMS y que como mucho su aplicación durase hasta pasadas unas determinadas fracciones de segundo (determinar otra posición del pistón), pero aquí el programa encuentra limitaciones que no lo permiten. Es por ello que se ha tenido que limitar la aplicación de la fuerza condicionada por la velocidad del pistón.

Una buena prueba para ver si funciona correctamente el movimiento del pistón y la fuerza aplicada sobre él, es quitar la condición de que la velocidad del eje sea inferior o igual a 2175 rpm. Así se ve el instante en el que se aplica la fuerza, que como puede comprobarse, solamente se aplica cuando el pistón está en el PMS. El único problema que esto conlleva es que el motor se comporta como un motor de 2 tiempos, es decir, en cada subida al PMS del pistón, el programa interpreta que debe aplicar la fuerza sobre la cabeza del pistón, y, como no deja condicionar la aplicación de dicha fuerza a la posición del pistón, resulta pues inaceptable el comportamiento del conjunto motor, ya que este tipo de motores es de 4 tiempos.



**Figura.4.2.2 :** Si se quita la condición de la velocidad angular máxima de 2175 rpm se puede observar como la fuerza (onda cuadrada) se aplica cuando la velocidad (onda senoidal) es menor o igual que cero.



*Figura.4.2.3: El principal problema de no limitar la aplicación de la fuerza, es que al no tener el motor ningún tipo de fricción la velocidad del eje se acelera y se dispara*

# **5. ANÁLISIS DE DISEÑO DEL MOTOR Y TRABAJOS FUTUROS**

5.1	Análisis con Inventor .....	49
5.2	Extracción de Resultados .....	49
5.3	Conclusiones del Modelo.....	52



Durante este capítulo se va a abordar el análisis del diseño que se ha realizado en los capítulos anteriores. Una vez se ha simulado la biela principal con su correspondiente pistón, queda comprobar si las dimensiones que se han estado considerando hasta el momento, son suficientes para soportar la carga debida a la presión que se genera sobre la cabeza del pistón. Para ello se utilizará el método de los elementos finitos.

Se tendrán que importar las cargas debidas al movimiento durante la simulación mecánica, que se trasladarán a la biela principal durante la fase posterior al transitorio en el cuál se aplica la carga. Finalmente mediante estas cargas el programa generará una tensión equivalente mediante el método de Von Mises que se comparará con el límite elástico del material seleccionado para la biela principal, de esta forma se sabrá si puede o no soportar las cargas que se le aplican y se puntualizarán algunos detalles para obtener las conclusiones y dar por finalizado el documento de la memoria de este trabajo académico.

## **5.1 Análisis con Inventor**

Para determinar las fuerzas que se deben de transmitir a la biela principal se tendrá que determinar cuál es la fuerza máxima que se genera durante la simulación sobre el par cilíndrico 3 (formado por la biela principal y el conjunto formado por el eje motor, el eje principal y el volante de inercia) y de la misma forma, sobre el par cilíndrico 1, que a su vez está constituido por la biela principal en su parte superior y el conjunto formado por el casquillo superior de dicha biela, el casquillo del pistón y el propio pistón con los tacos del perno que lo acompañan de forma solidaria en su movimiento.

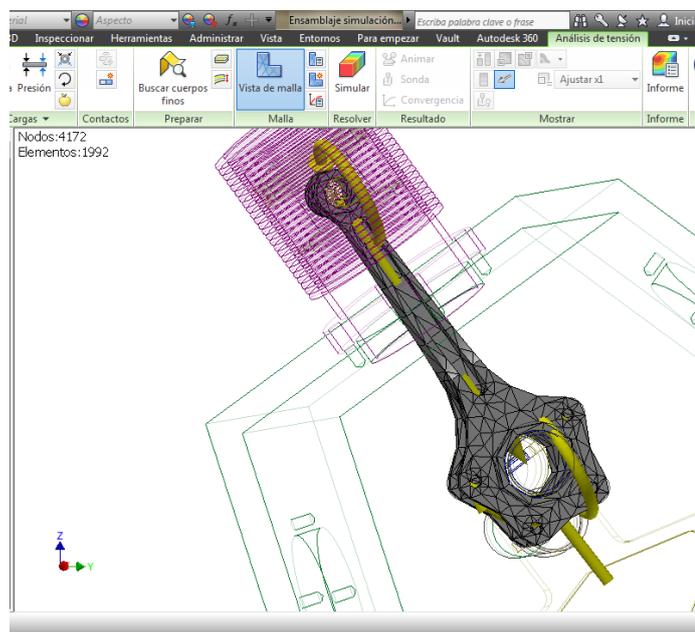
Para ello, una vez ya se ha simulado, solamente se necesita graficar estas dos fuerzas (con todas sus componentes en los 3 ejes) y buscar sus máximos, que pueden, o no, coincidir en el mismo instante de tiempo. Para evitar coger el valor que corresponde con el instante en que se aplica la carga (ya que naturalmente esta se transmitiría prácticamente de forma entera como un axil a la biela principal) se va a obviar este tramo que se considera un transitorio y se va a estudiar el caso en el que el movimiento del conjunto ya lleva una trayectoria cíclica. En este tramo se busca un máximo, que, en este caso, corresponde de la misma forma, con el máximo de las dos fuerzas. Los valores de las mismas son 9359.49 N para el caso de la fuerza sobre la parte superior, y 17100.7 N sobre la parte inferior. El instante de tiempo que corresponde a ello es el  $t=0.04025$  s. Este tiempo es el que se va a exportar al MEF, por tanto se marca con un tic y se pasa a la exportación de tiempo al MEF

## **5.2 Extracción de Resultados**

Para la exportación de datos desde la simulación Autodesk permite que fácilmente se pasen unas reacciones a elementos de cálculo y de esta forma se obtengan resultados fácilmente. Esto el programa lo realiza mediante la selección de aquellas piezas que se van a analizar. En el caso de estudio solamente es una pieza, la biela, por tanto se selecciona y ya se puede salir de la parte de simulación dinámica.

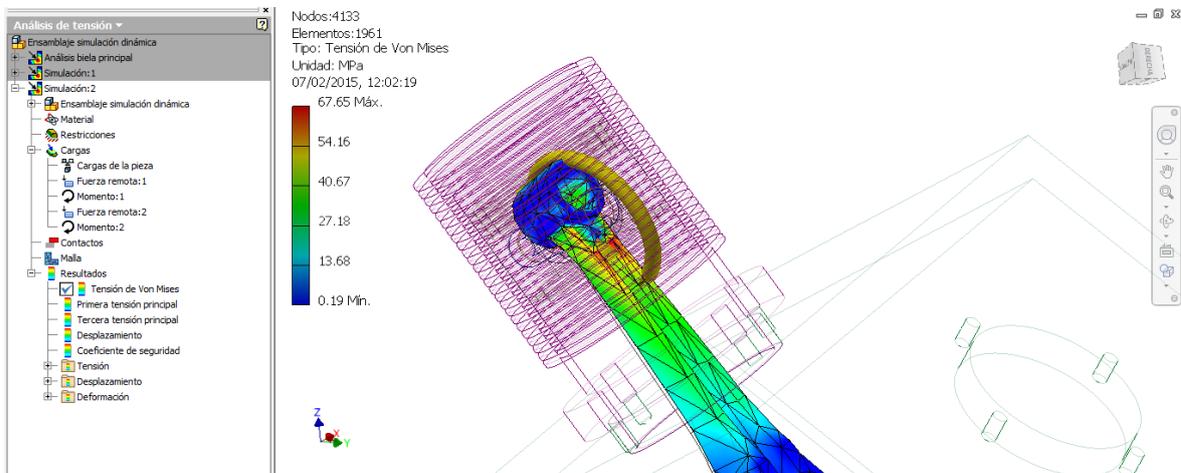
A continuación se escoge dentro del menú de *Entornos* la opción de *Análisis de Tensión*. Una vez aquí se crea una simulación, que se guarda con el nombre que se quiera, en este caso “Análisis de la Biela” y se selecciona las opciones *Detectar y eliminar modos de cuerpo rígido* y *Análisis de cargas en movimiento*. Estas dos opciones permiten que en el caso de no existir suficientes restricciones estructurales como para fijar el elemento en el espacio, este no pueda escaparse, es decir, cumpla leyes físicas básicas, pues el cuerpo no puede esquivar las cargas que se aplican sobre él por ejemplo. Y en el segundo caso, sirve para que cuando se importan cargas desde una simulación dinámica previa, como es el caso, el propio usuario sea quien elija aquellos pasos de tiempo que se consideren oportunos. Tras seleccionar esta segunda opción el programa detecta el paso de tiempo que se ha marcado anteriormente para importarla ahora ( $t=0.04025$  segundos).

Tras unos momentos de cálculo del programa, ya se puede visualizar la malla y simular por primera vez.



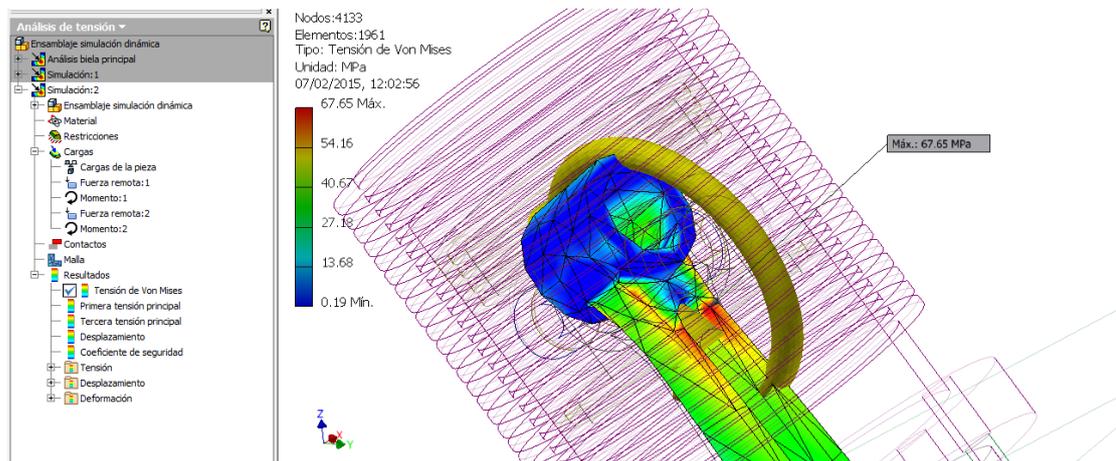
**Figura 5.2.1:** Visualización de la malla sobre la Biela Principal

Finalmente queda visualizar como quedaría el gráfico de colores que muestra en las zonas donde mayor tensión hay. Para ello se muestra la tensión de Von Mises en el cuadro de la izquierda.



**Figura 5.2.2:** El gráfico de colores muestra los valores de la tensión equivalente de Von Mises. Los colores más cálidos muestran mayores tensiones que en las zonas en las que se muestra colores más fríos.

Para mostrar el punto con mayor tensión en la pestaña de opciones mostrar, solamente se tiene que pulsar para que muestre dicho punto. Del mismo modo se puede hacer con el punto que corresponde a la menor carga. El valor máximo se encuentra en la parte superior donde se junta el cuerpo de la biela con el orificio en el que se aloja el casquillo del pistón, en esta zona la tensión equivalente de Von Mises adquiere un valor de 67.65 MPa.

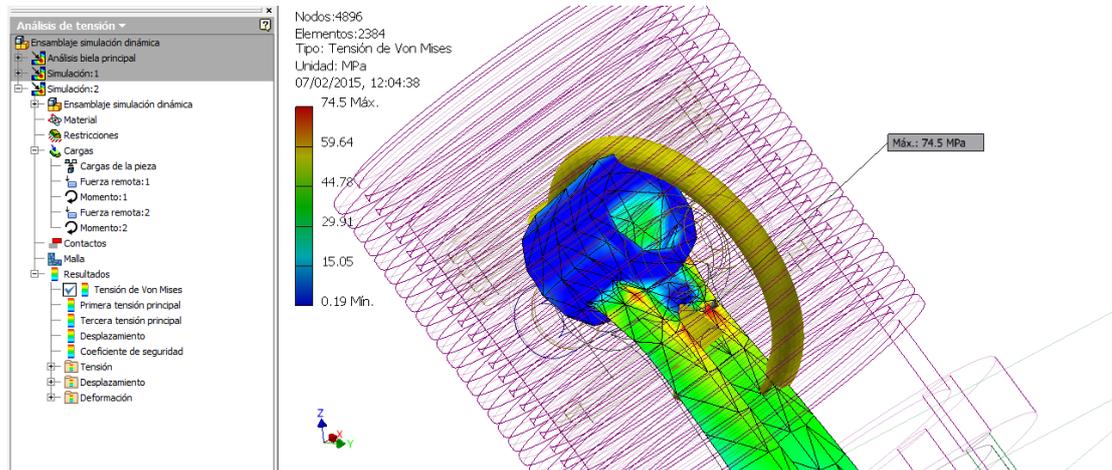


**Figura 5.2.3:** Punto máximo de tensión equivalente de Von Mises

El valor máximo de refinados de tipo H se marca en 3, para que de esta forma se evite el problema de redondeo y se tienda a la solución con un criterio de parada de cómo máximo el 10 %, es decir, si la siguiente iteración es menor de un 10% de la que ya se obtiene, se para de iterar. Y

tras este movimiento se vuelve a simular. Ahora la solución sí que es más exacta. Para visualizarla, se vuelve a mostrar el valor máximo.

El valor del máximo ha cambiado de valor como era de esperar ya que se ha tendido a la solución de forma más aproximada dentro de los parámetros que se han marcado de convergencia. Con ello el valor que se obtiene ahora es de 74.5 MPa y se sitúa en la misma zona que en el caso anterior.



*Figura 5.2.4: Punto de máxima tensión tras la convergencia a la solución*

### 5.3 Conclusiones del Modelo

Tras la simulación que se ha llevado a cabo al conjunto motor particularizado a la biela principal y su correspondiente pistón se han generado unas tensiones sobre la biela. Estas tensiones han sido analizadas por el programa para finalmente obtener la tensión equivalente de Von Mises, la cual se debe de comparar con el límite elástico del material que conforma el elemento. En este caso se trata de acero inoxidable, el cual tiene un límite elástico de alrededor de 210 GPa, es decir, 210000 MPa [6].

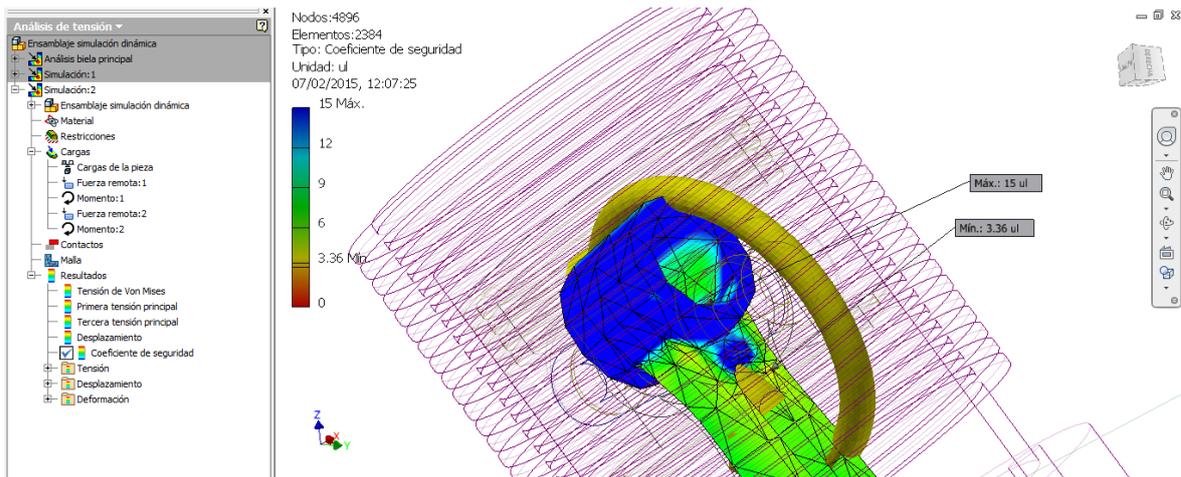
La tensión máxima que se ha obtenido tras el análisis por el Método de Elementos Finitos (MEF) ha determinado que la zona de mayor tensión se encuentra en algunos puntos de la parte superior de la biela, justo en la parte donde se une el cuerpo con el agujero donde va el casquillo superior de esta. Como era de esperar ese valor es máximo en estos lugares por varios factores, entre los que cabe destacar:

- a) La pequena sección que en esos lugares se tiene.
- b) Las entallas que tiene la biela en el cuerpo hacen que estos puntos tengan acumulación de tensiones y por tanto sean idóneos para propiciar deformaciones irreversibles en el caso de superar el límite elástico.

El límite elástico queda por tanto con un valor muy alejado frente a los valores que en esos puntos se obtiene de la tensión equivalente de Von Mises. Esto se debe, en parte, a que se han estado asumiendo hipótesis que no serían del todo cierto en el caso real, ya que el caso de estudio

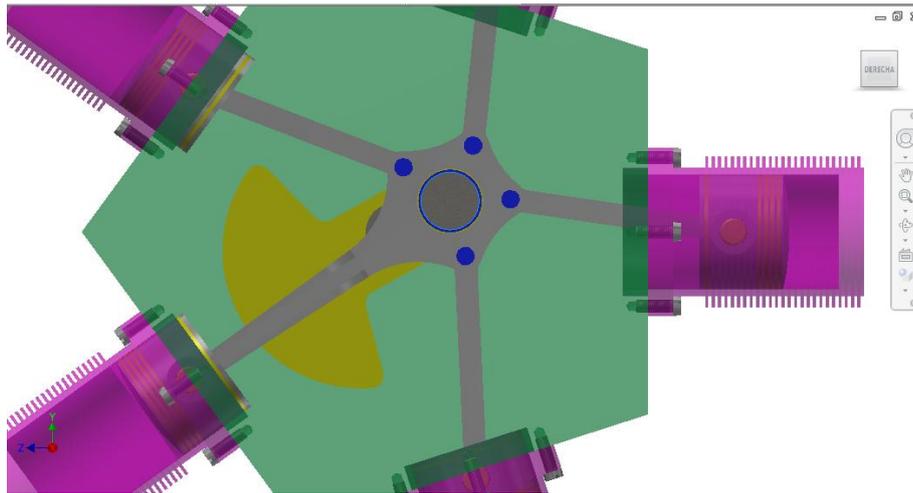
se ha planteado en un caso ideal (por ejemplo sin considerar rozamientos) o simplificando de forma que las tantas variables de diseño quedaran reducidas a unas cuantas con las que se pudiese maniobrar.

Con todo esto el programa deja comprobar cuál sería el coeficiente de seguridad mínimo, y para este caso de estudio se trata de un factor de 3.36. Por tanto si este factor está dentro de las hipótesis, se puede considerar que las dimensiones de la página web de la que se han tomado la mayoría de las dimensiones de las piezas, cumplen con este criterio y por tanto podrían formar parte de un proyecto de diseño de un motor radial.

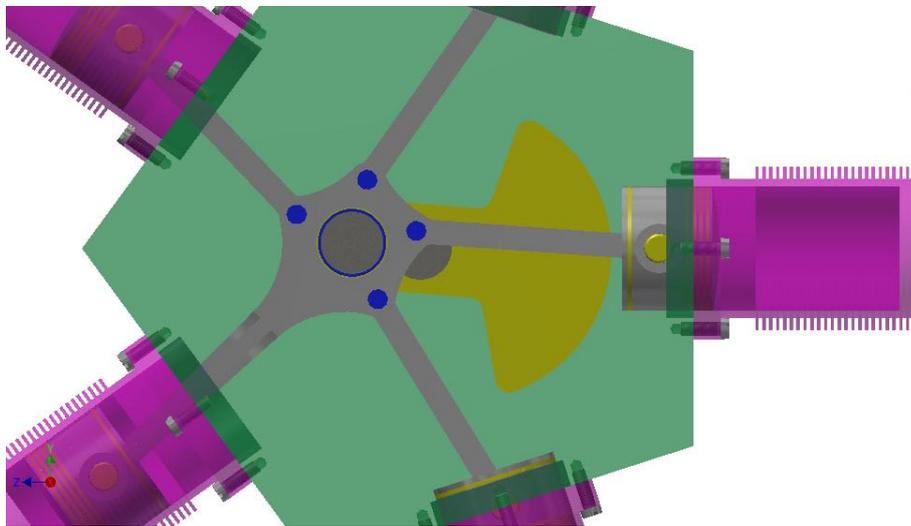


**Figura 5.3.1:** El factor de seguridad toma un valor de 3.36 en el mínimo y de un máximo de 15

Como punto final de este documento de memoria del trabajo final de grado, se hace notar que una de las mejoras de las que se le puede dotar a este motor radial, es la geometría de la biela principal y de la secundaria. En particular la biela principal no está bien implementada (error por parte del creador de las piezas que se obtuvieron de la página web que sirvió de apoyo para generar las distintas piezas) ya que la posición de los agujeros donde se sitúan los pasadores que unen a las demás bielas con la principal hacen que, cuando se mueve el ensamblaje, los pistones de las bielas secundarias tienen una menor relación de compresión. Esto desde el punto de vista mecánico no es correcto, ya que se estaría asumiendo que habría dos tipos de relaciones de compresión dentro del mismo motor, una para el cilindro que tiene la biela principal y otra para aquellos cilindros formados por bielas secundarias.



**Figura 5.3.2:** *Ensamblaje Radial con el pistón de la Biela Principal en el PMI antes de la modificación del diseño*



**Figura 5.3.3:** *Ensamblaje Radial con el pistón de una de las Bielas Secundarias en el PMI antes de la modificación del diseño*

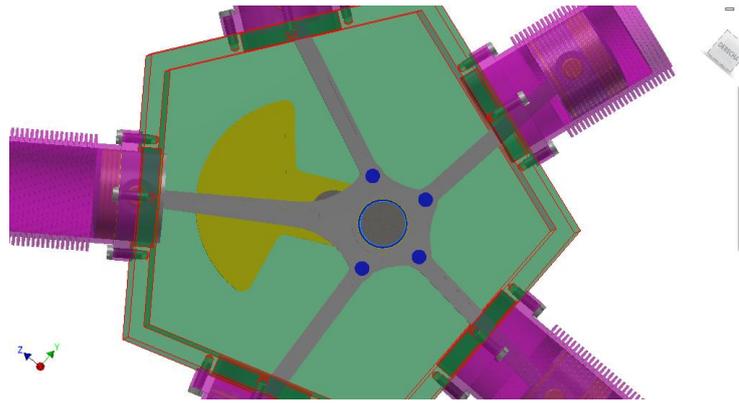
Por tanto para evitar este tipo de incidencia lo que se puede hacer es modificar en dos pasos la biela principal y posteriormente la biela secundaria.

a) Modificaciones sobre la biela principal.

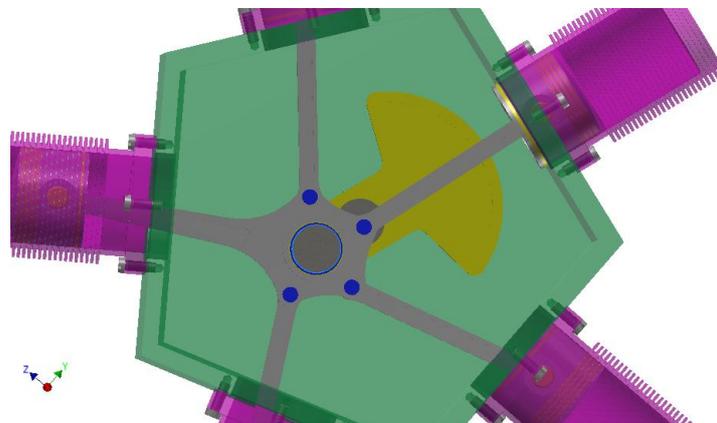
Sobre esta biela principal lo que se hace es cambiar la posición de los agujeros donde se alojan los pasadores que sirven de unión con las bielas secundarias. Estos agujeros deben de situarse a  $72^\circ$  unos de los otros de forma que se repartan equitativamente a lo largo de los  $360^\circ$ . Además deben de estar separados 100 mm del eje principal. De esta forma la carrera de todos los pistones es la misma.

b) Modificaciones sobre la biela secundaria.

Sobre esta pieza se hace una rápida modificación, solamente se debe de cambiar la distancia entre agujeros, que pasará de los 178 mm iniciales a 200 mm. De esta forma las dos bielas quedan bien definidas.



*Figura 5.3.4: Ensamblaje Radial con el pistón de la Biela Principal en el PMI tras la modificación del diseño*



*Figura 5.3.5: Ensamblaje Radial con el pistón de una de las Bielas Secundarias en el PMI tras la modificación del diseño*

Estos cambios son los que, con un buen modelado se pueden llevar a cabo. En cambio si no se hubiese realizado una restricción total de las cotas, estos cambios hubiesen generado resultados muy diferentes, por tanto el modelado no habría sido correcto.



# Bibliografía

- [1] Oficina Española de Patentes y Marcas (2015). *Estrategia para los prototipos*. Consultada el 17/01/15, en [http://www.oepm.es/es/invenciones/herramientas/manual\\_del\\_inventor/prueba\\_de\\_la\\_invencion/estrategia\\_para\\_los\\_prototipos.html](http://www.oepm.es/es/invenciones/herramientas/manual_del_inventor/prueba_de_la_invencion/estrategia_para_los_prototipos.html)
- [2] Wikipedia, (2014). *Motor Wankel*. Consultada el 17/01/15, en [http://es.wikipedia.org/wiki/Motor\\_Wankel](http://es.wikipedia.org/wiki/Motor_Wankel)
- [3] Wikipedia, (2014). *Motor Radial* Consultada el 17/01/15, en [http://es.wikipedia.org/wiki/Motor\\_radial](http://es.wikipedia.org/wiki/Motor_radial)
- [4] Payri F. y otros (2011). *Motores de Combustión Interna Alternativos*. Valencia. Ed UPV
- [5] Younis W. (2012). *Up and running with Autodesk Inventor Simulation*. Barcelona. Marcombo
- [6] Mocholí A. J. y otros (2011) *Elasticidad y Resistencia de Materiales*. Anexo II: Características Mecánicas de Algunos Materiales. Valencia. Ed UPV.



# Lista de Figuras

<i>Figura 1.1.1: Diagrama precisión-volumen ciclo diesel</i>	5
<i>Figura 1.1.2: Motor Radial</i>	5
<i>Figura 2.2.1: Comportamiento lineal (recta a la izquierda del punto a) frente al comportamiento no lineal (recta a la derecha del mismo punto)</i>	12
<i>Figura 3.1.1: Forma de las bielas secundarias (pequeñas) y la biela principal en un motor radial de 9 cilindros</i>	17
<i>Figura 3.1.2: Hendiduras para posicionar las arandelas de estanqueidad</i>	19
<i>Figura 3.1.3: Escariado del agujero</i>	20
<i>Figura 3.1.4: Se le atribuyen propiedades físicas que después se utilizarán durante la simulación mecánica</i>	21
<i>Figura 3.1.5: Dado que el cuerpo de la biela no queda del todo claro se ha tenido que inventar un radio de empalme de 250 mm para cubrir esa carencia en los planos de forma que se respete de la mejor forma posible las otras restricciones</i>	22
<i>Figura 3.1.6: Biela secundaria tras el diseño 3D</i>	24
<i>Figura 3.1.7: Base con agujeros del cilindro</i>	25
<i>Figura 3.1.8: La base de 20 mm que se crea da estabilidad estructural al sistema</i>	26
<i>Figura 3.1.9: El agujero de 92 mm de diámetro se realiza para que el pistón pueda moverse por su interior</i>	26
<i>Figura 3.1.10: Cilindro aleteado para un motor radial</i>	27
<i>Figura 3.1.11: Extrusión de la hendidura</i>	29
<i>Figura 3.2.1: Mediante la operación de restricción de tipo coincidencia el pistón solo puede moverse por el interior del agujero en el bloque motor</i>	34
<i>Figura 3.2.2: Ensamblaje entre el casquillo del pistón y el casquillo sup. de la biela principal</i>	35
<i>Figura 3.2.3: Restricción de la translación del eje</i>	36
<i>Figura 3.2.4: Conjunto del motor radial completo restringido</i>	36
<i>Figura 4.2.1: En la parte superior, la fuerza aplicada sobre la cabeza del pistón. En el centro, la velocidad de revolución del eje motor que se limita a 2175 rpm en las condiciones (13050 grados/s). Y en la parte de abajo, el movimiento oscilatorio del pistón.</i>	44
<i>Figura.4.2.2 : Si se quita la condición de la velocidad angular máxima de 2175 rpm se puede observar como la fuerza (onda cuadrada) se aplica cuando la velocidad (onda senoidal) es menor o igual que cero.</i>	45
<i>Figura.4.2.3: El principal problema de no limitar la aplicación de la fuerza, es que al no tener el motor ningún tipo de fricción la velocidad del eje se acelera y se dispara</i>	46
<i>Figura 5.2.1: Visualización de la malla sobre la Biela Principal</i>	50
<i>Figura 5.2.2: El gráfico de colores muestra los valores de la tensión equivalente de Von Mises. Los colores más cálidos muestran mayores tensiones que en las zonas en las que se muestra colores más fríos.</i>	51
<i>Figura 5.2.3: Punto máximo de tensión equivalente de Von Mises</i>	51
<i>Figura 5.2.4: Punto de máxima tensión tras la convergencia a la solución</i>	52
<i>Figura 5.3.1: El factor de seguridad toma un valor de 3.36 en el mínimo y de un máximo de 15</i>	53
<i>Figura 5.3.2: Ensamblaje Radial con el pistón de la Biela Principal en el PMI antes de la modificación del diseño</i>	54

<i>Figura 5.3.3: Ensamblaje Radial con el pistón de una de las Bielas Secundarias en el PMI antes de la modificación del diseño.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 5.3.4: Ensamblaje Radial con el pistón de la Biela Principal en el PMI tras la modificación del diseño .....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 5.3.5: Ensamblaje Radial con el pistón de una de las Bielas Secundarias en el PMI tras la modificación del diseño.....</i>	<i>55</i>

**Documento II:**

# Anexos



# **ÍNDICE GENERAL**

1.1	Planos de Apoyo para la Generación de las Piezas del Motor Radial .....	3
1.2	Características Mecánicas de Algunos Materiales.....	5



## 1.1 Planos de Apoyo para la Generación de las Piezas del Motor Radial

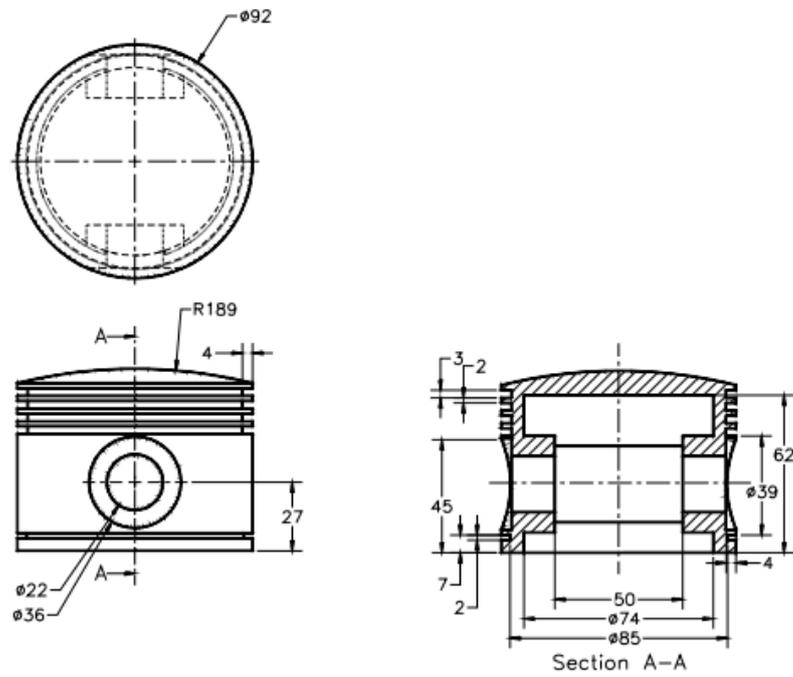


Figura 1.1.1: Pistón

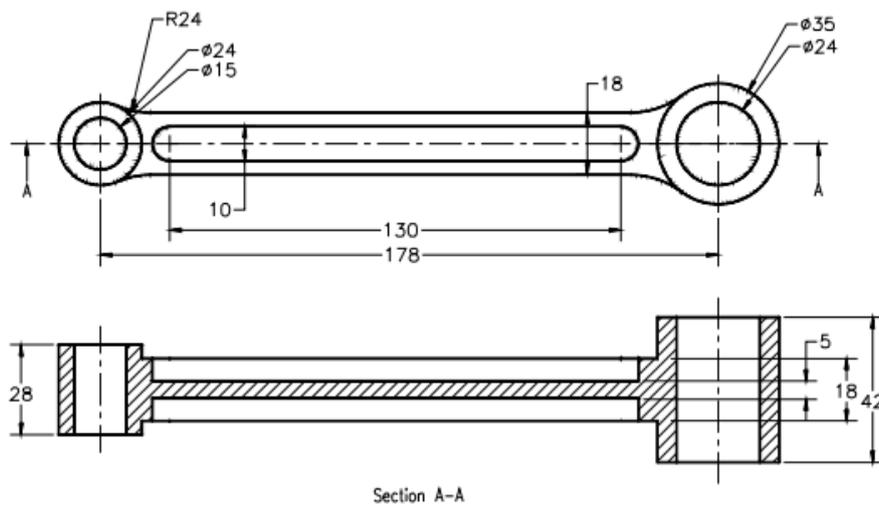


Figura 1.1.2: Biela Secundaria



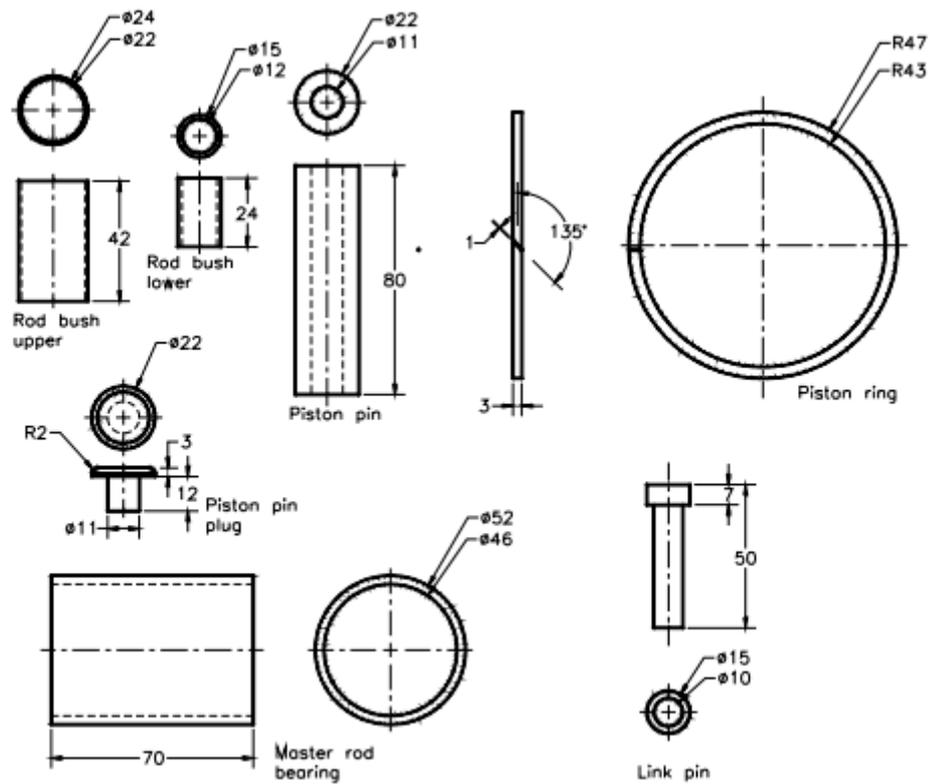


Figura 1.1.4: Casquillos de las bielas, Anillo del Pistón, Perno del Pistón, Taco del Perno del Pistón y Pasador

## 1.2 Características Mecánicas de Algunos Materiales

Material	Módulo de Elasticidad (GPa)	Módulo de Elasticidad transversal (GPa)	Coefficiente de Poisson
Acero	190 - 210	75 - 80	0.27 - 0.3
Aleaciones de Aluminio	70 - 79	26 - 30	0.33



**Documento III:**

# Presupuesto



# **ÍNDICE GENERAL**

1.1	Partida 1: Desarrollo del Trabajo Final de Grado.....	3
1.2	Partida 2: Herramientas y Material Empleados .....	4
1.3	Presupuesto General .....	5



## 1.1 Partida 1: Desarrollo del Trabajo Final de Grado

Para el desarrollo del Trabajo Final de Grado (TFG), se han empleado un total de 300 horas (h) que según la dificultad que ha conllevado cada una de las distintas partes se dividen en:

- a) Estudio, análisis y diseño del motor radial: 195 horas. Esta parte ha supuesto el mayor porcentaje de dedicación, entre saber cuáles deberían de ser las dimensiones del motor, adaptar los planos que se encontraron en la web para las distintas piezas y diseñar aquellas que no estaban en los documentos y finalmente, durante la simulación dinámica y el posterior análisis del propio motor.

Estas horas tienen una tarifa de 50 €/h, un coste, que debido a que se trata de un proyecto puntual puede asumirse. No hay que confundir este coste horario con lo que, de media, recibe en el mundo laboral un titulado con esta carrera por sus servicios, ya que con esta tarifa horaria durante un mes de 160 h/mes (considerando 8 h/día y 5 días/semana durante 4 semanas) se estaría indicando que el sueldo sería de 8000 €/mes, lo que dista bastante de la realidad.

- b) Realización de planos: 11 horas. Esta parte es la de menor porcentaje, ya que una vez se han realizado las piezas solamente hace falta plasmar las dimensiones en los planos.

La tarifa horaria de esta parte podría haberse considerado de 23 €/h ya que cualquier técnico podría realizar planos, o al menos debería según sus aptitudes, pero se ha utilizado la misma tarifa que en el anterior caso ya que, al tratarse de un motor de aviación, estaría en juego la integridad de, al menos una persona, si algún elemento estuviese mal dimensionado y pudiese generar una perturbación crítica. Por ello se considera que debería estar bien supervisada.

- c) Documentación y realización de informes: 70 horas. Esta es la última parte que conforma esta primera partida y que completa las 300 horas de las que consta el TFG. En este caso sí se considera la tarifa de 23 €/hora ya que no es necesaria una supervisión excesiva ni requiere de conocimientos técnicos.

PARTIDA 1: DESARROLLO DEL TRABAJO FINAL DE GRADO				
Concepto	Unidad Básica	Cantidad de Unidades Básicas	Precio (€) por Unidad Básica	Total (€)
Estudio, análisis y diseño del motor radial	h	195	50.00 €	9,750.00 €
Documentación y realización de informes	h	70	23.00 €	1,610.00 €
Realización de planos	h	11	50.00 €	550.00 €
			Costes Indirectos	2%
			Subtotal (1.1)	12,148.20 €

## 1.2 Partida 2: Herramientas y Material Empleados

Por otro lado, en la segunda partida figuran aquellas herramientas que se han utilizado durante la realización de este trabajo académico. Estas herramientas son:

- a) El coste de amortización del ordenador portátil: El portátil utilizado es de la marca ACER y se ha utilizado durante todo el proceso, desde el primer momento para buscar información hasta el último instante para redactar los distintos documentos que conforman el TFG.

El coste de amortización se ha fijado en 3 años, o lo que es lo mismo 5280 horas de trabajo, de las cuales, 300 h ya se han empleado durante el TFG. El coste del mismo portátil fue de 635 euros, y, aunque se debería de incluir el desgaste y la devaluación desde su compra en 2013, por motivos de simplificación, no se han tenido en cuenta (en el caso real deben de incluirse si es que se quiere adaptar el coste de este portátil en el presupuesto para una mejor aproximación del coste).

- b) El coste de amortización del programa junto con la licencia Autodesk Inventor Professional 2014: El coste de este según la página web de Autodesk es de 8000 euros. Y se esperaría poder amortizarlo en 4 años, que es el periodo en el que más o menos el software se debería cambiar dado que estaría ya desfasado. Este programa se ha utilizado solamente durante el proceso de generación de las piezas, durante la simulación dinámica y posterior tratamiento de los datos que se generaron y posteriormente para la realización de los planos de detalle. Lo que viene siendo un total de 206 horas en total.



<b>PARTIDA 1: DESARROLLO DEL TRABAJO FINAL DE GRADO</b>				
Concepto	Unidad Básica	Cantidad de Unidades Básicas	Precio (€) por Unidad Básica	Total (€)
Estudio, análisis y diseño del motor radial	h	195	50.00 €	9,750.00 €
Documentación y realización de informes	h	70	23.00 €	1,610.00 €
Realización de planos	h	11	50.00 €	550.00 €
			Costes Indirectos	2%
			Subtotal (1.1)	12,148.20 €
<b>PARTIDA 2: HERRAMIENTAS Y MATERIAL EMPLEADOS</b>				
Concepto	Precio del Concepto (€)	Amortización (h)	Uso (h)	Total (€)
Amortización del ordenador portátil "ACER"	635.00 €	5280	300	36.08 €
Amortización del programa + licencia Autodesk Inventor Professional 2014	8,000.00 €	7040	206	234.09 €
Amortización licencia Microsoft Office 2013	120.00 €	1760	70	4.77 €
Material de oficina y reprografía	100.00 €	N/A	N/A	100.00 €
			Costes Indirectos	2%
			Subtotal (1.2)	382.44 €
			<b>Coste total sin IVA</b>	12,530.64 €
			IVA	21%
			<b>Coste Total del TFG</b>	15,162.08 €

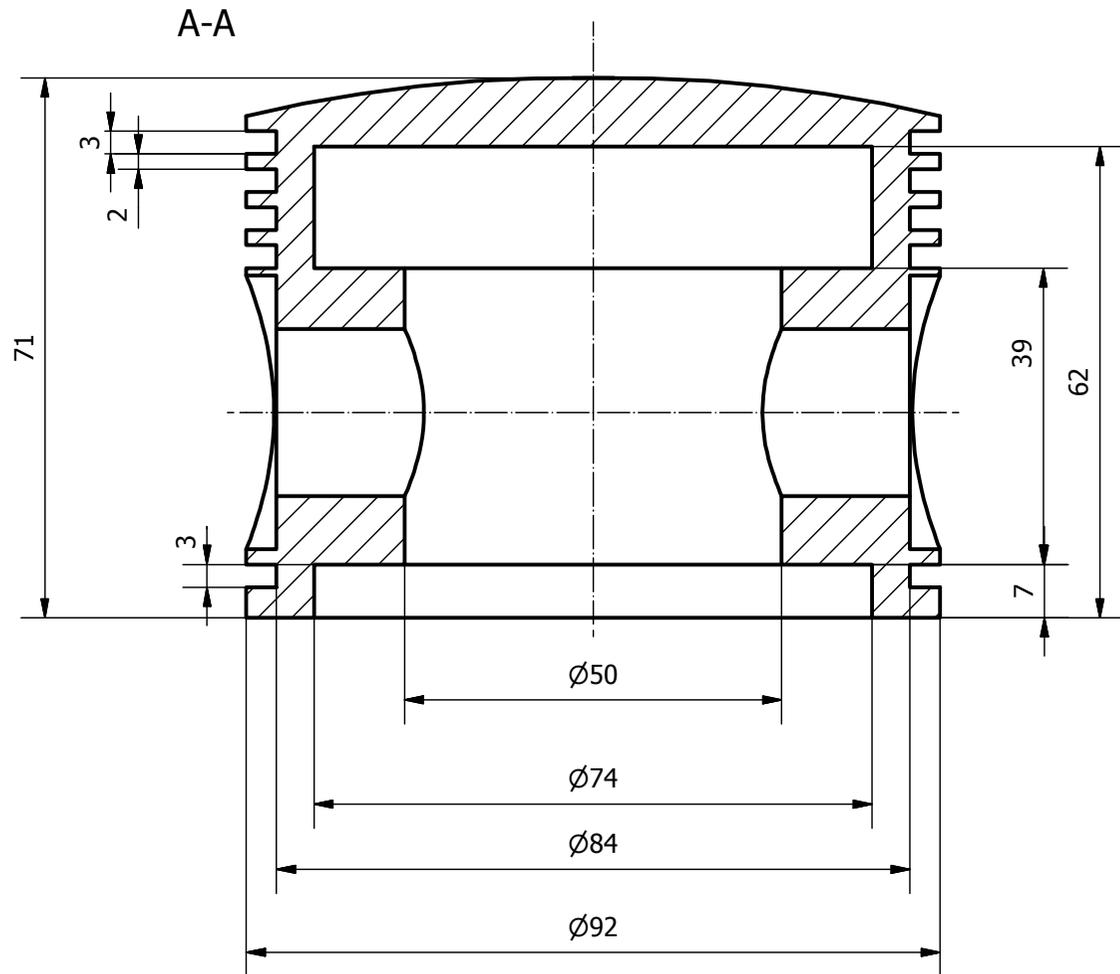
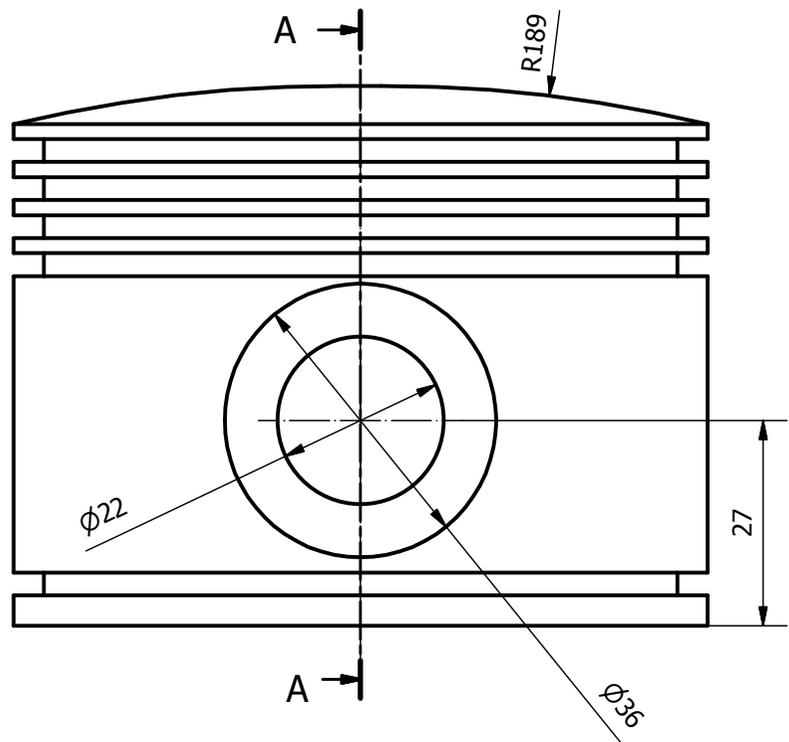
El coste total asciende a:

QUINCE MIL CIENTO SESENTA Y DOS EUROS CON OCHO CÉNTIMOS

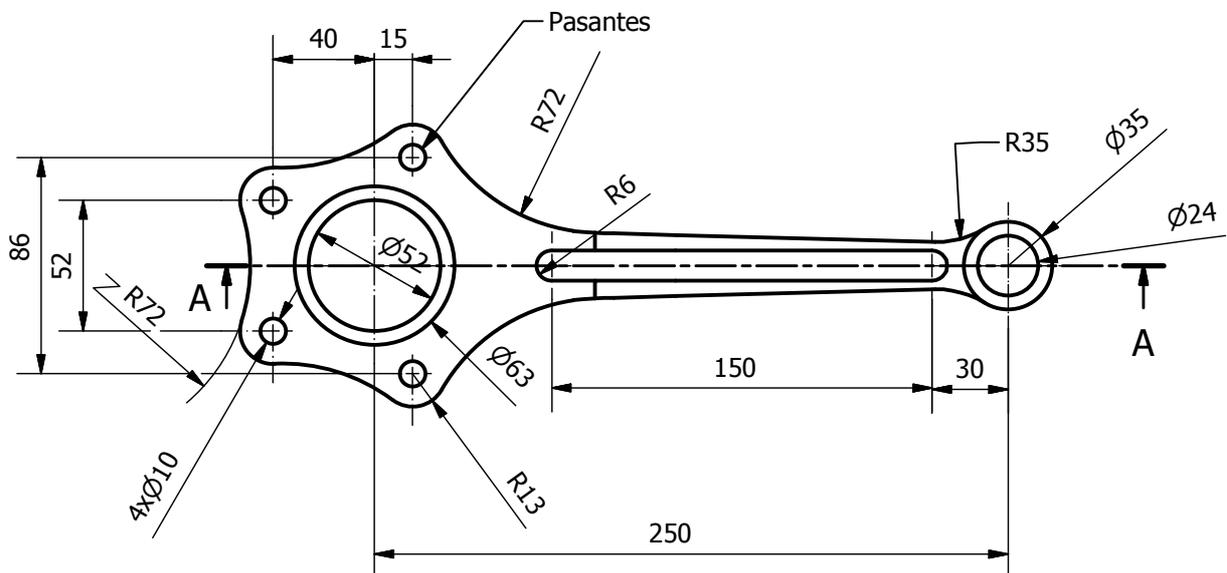
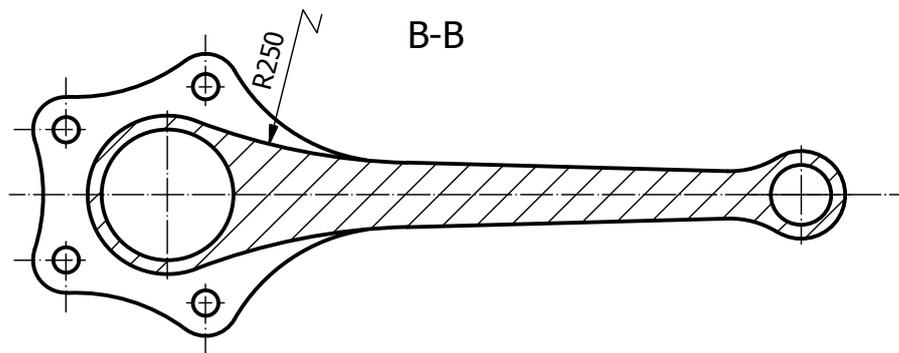
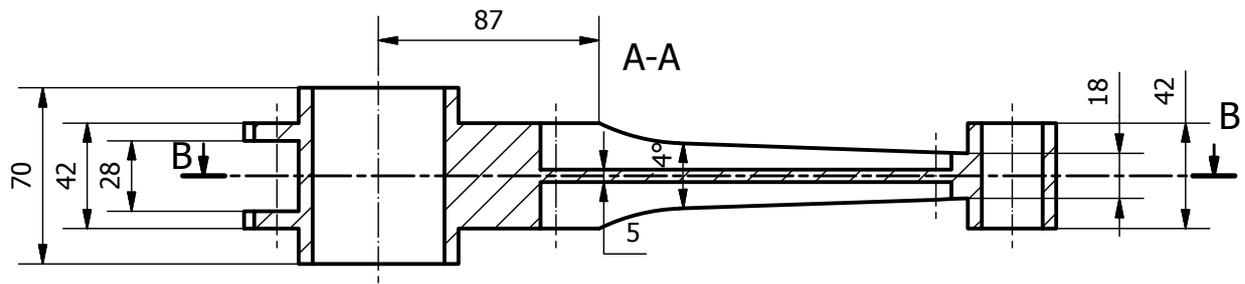
31/01/2015

# Documento IV: PLANOS

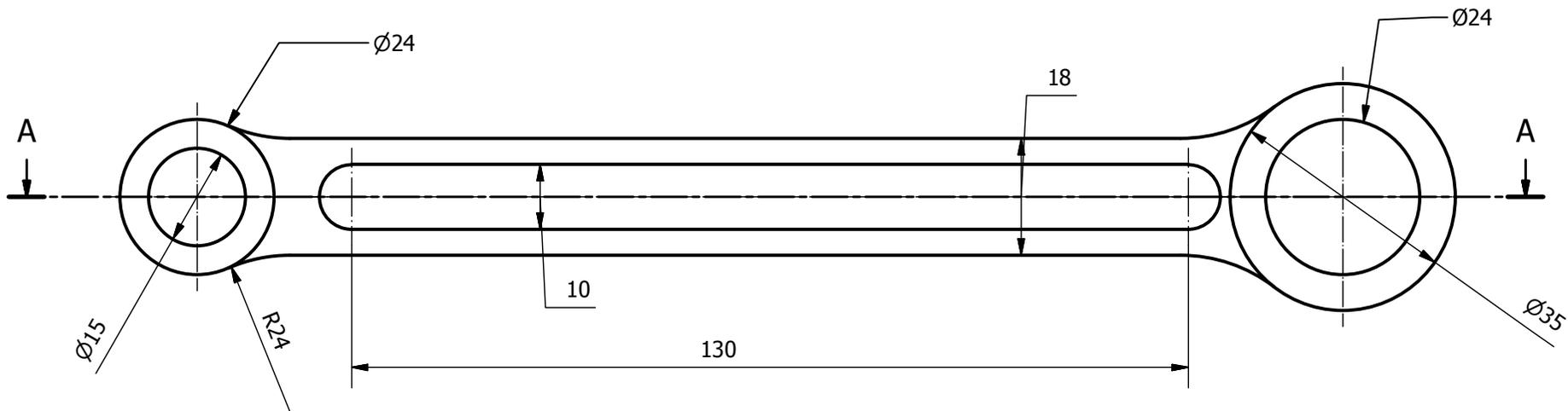
Plano del Pistón.....	1
Plano de la Biela Principal.....	2
Plano de la Biela Secundaria .....	3
Plano del Cilindro .....	4
Plano del Casquillo Superior de la Biela Secundaria.....	5
Plano del Casquillo Inferior de la Biela Secundaria .....	6
Plano del Eje Principal .....	7
Plano del Casquillo Inferior de la Biela Principal.....	8
Plano del Pasador.....	9
Plano de los Tacos del Perno del Pistón .....	10
Plano de los Anillos del Pistón .....	11
Plano del Casquillo del Pistón .....	12
Plano del Bloque Motor .....	13
Plano del Volante de Inercia.....	14
Plano del Eje Motor .....	15
Plano del Anillo del Eje .....	16
Plano del Conjunto Ensamblaje Radial .....	17



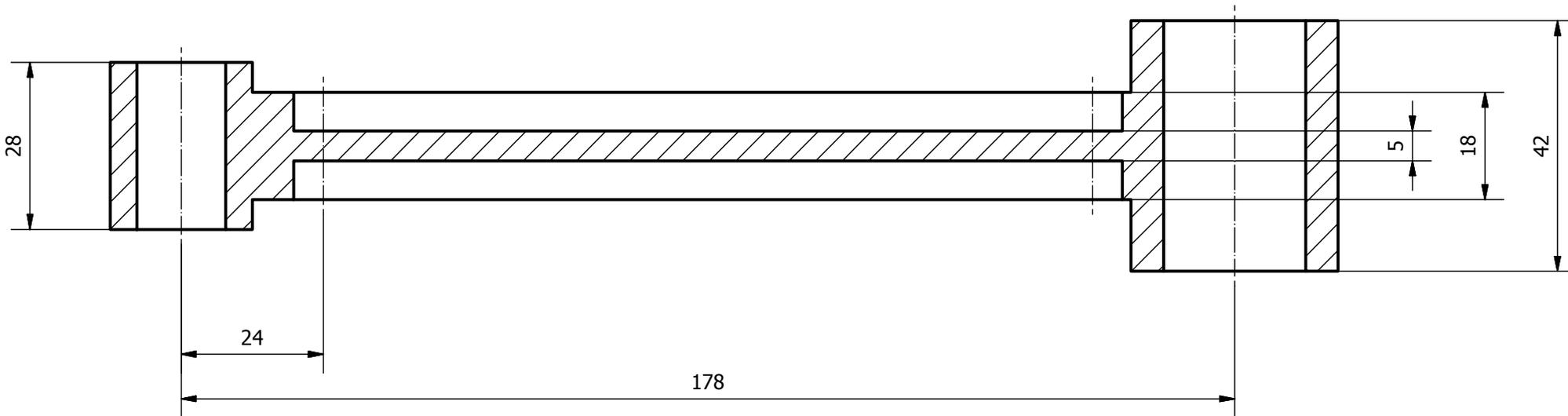
Diseño de Josep Fons Solaz	Dim. en mm	Escala 1:1	Fecha de comprobación 11/01/2015
TFG: Diseño de un motor radial de cinco cilindros. Generación de su prototipo y simulación mecánica	Documento: Planos		
	Pistón	Pieza nº 1	



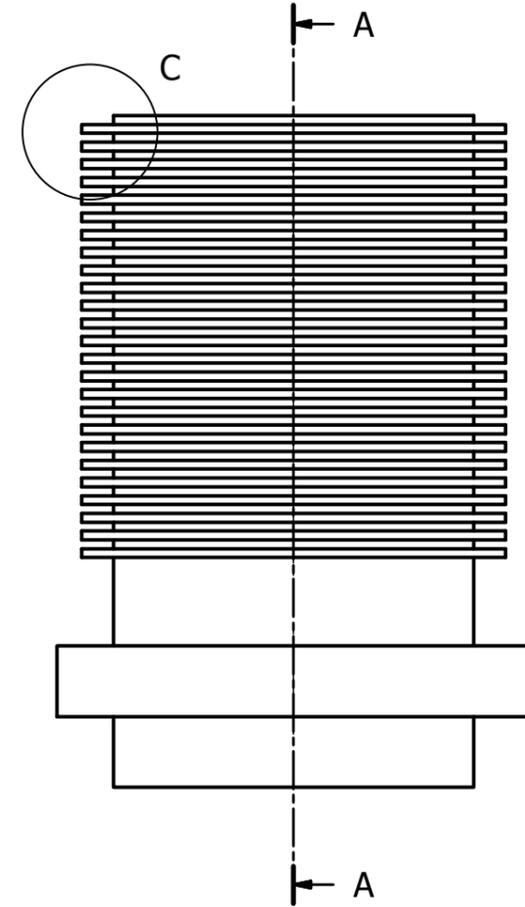
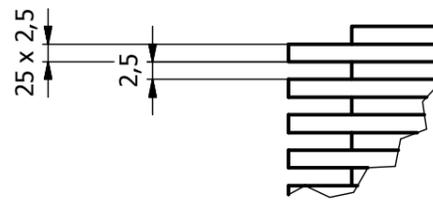
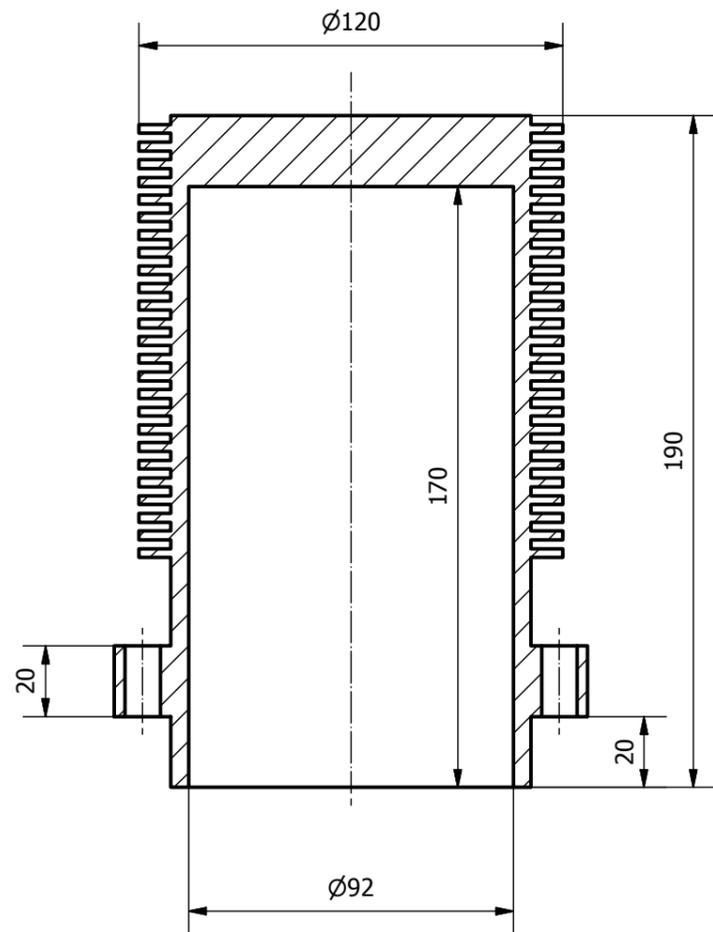
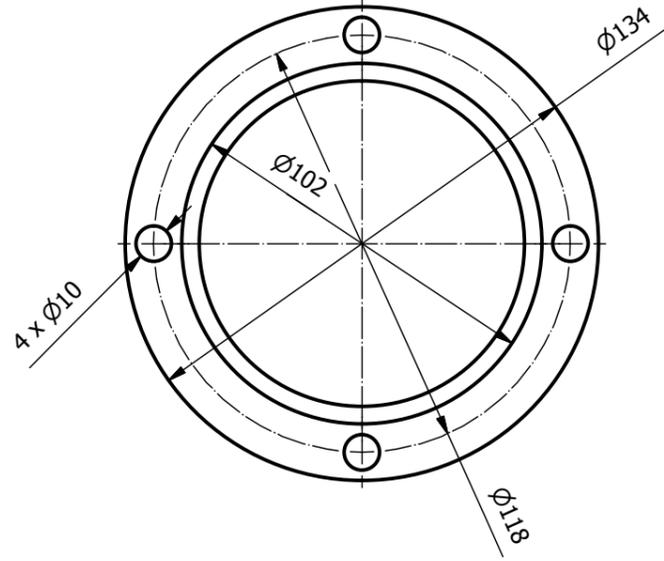
Diseño de Josep Fons Solaz	Dim. en mm	Escala 1:3	Fecha de comprobación 11/01/2015
TFG: Diseño de un motor radial de cinco cilindros. Generación de su prototipo y simulación mecánica	Documento: Planos		
	Biela Principal	Pieza nº 2	



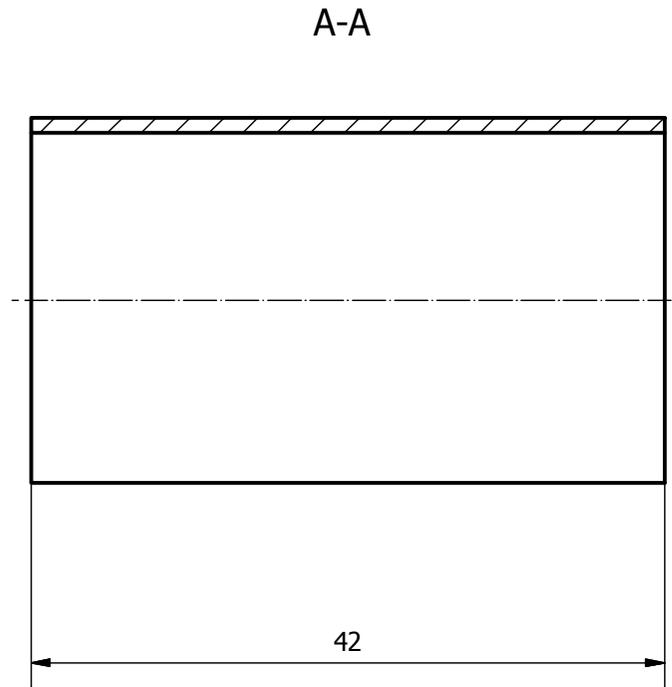
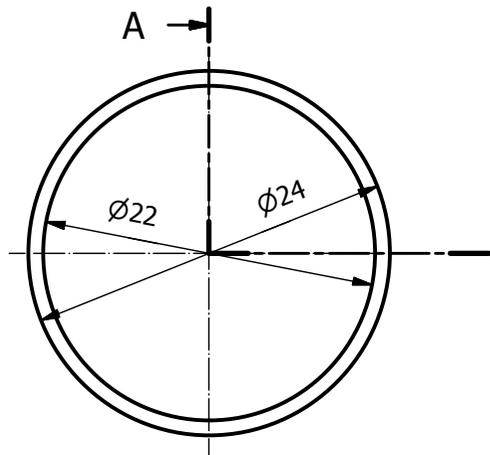
A-A



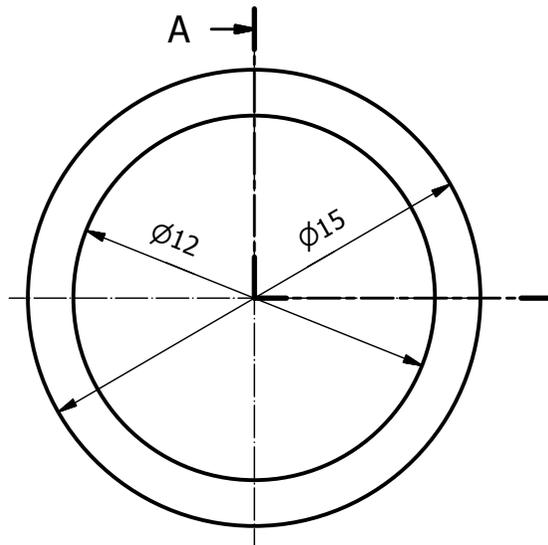
Diseño de Josep Fons Solaz	Dim. en mm	Escala 1:1	Fecha de comprobación 11/01/2015
TFG: Diseño de un motor radial de cinco cilindros. Generación de su prototipo y simulación mecánica	Documento: Planos		
	Biela Secundaria		Pieza nº 3



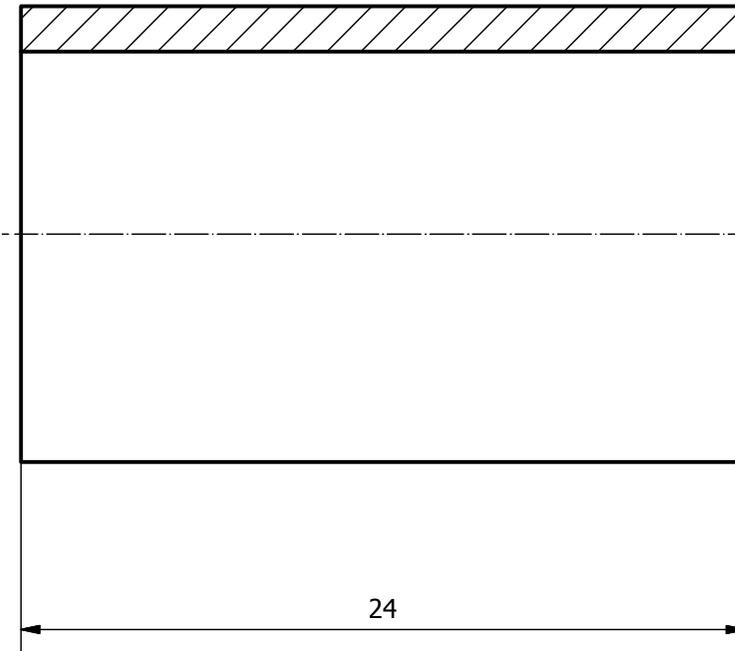
Diseño de Josep Fons Solaz	Dim. en mm	Escala 1:2	Fecha de comprobación 11/01/2015
TFG: Diseño de un motor radial de cinco cilindros. Generación de su prototipo y simulación mecánica	Documento: Planos		
	Cilindro	Pieza nº 4	



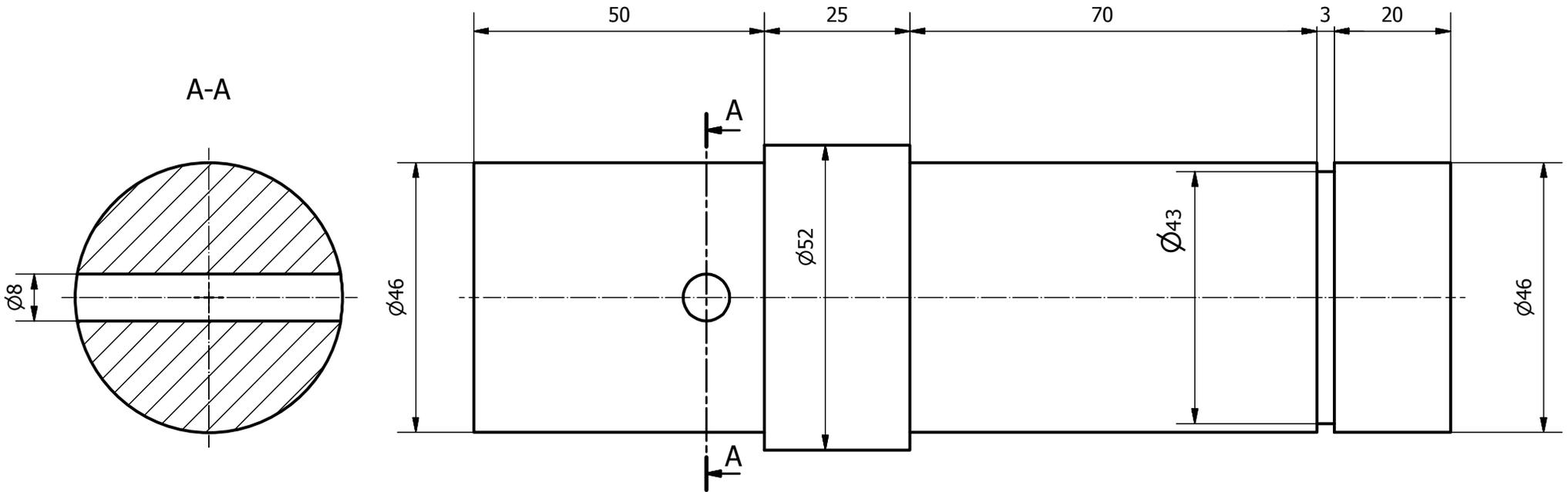
Diseño de Josep Fons Solaz	Dim. en mm	Escala 2:1	Fecha de comprobación 11/01/2015
TFG: Diseño de un motor radial de cinco cilindros. Generación de su prototipo y simulación mecánica	Documento: Planos		
	Casquillo sup. Biela Secundaria		Pieza nº 5



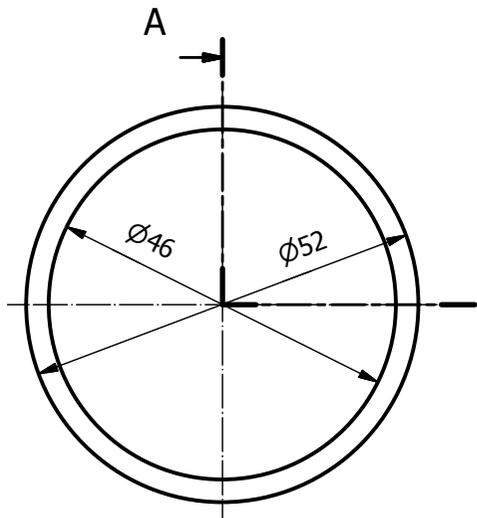
A-A



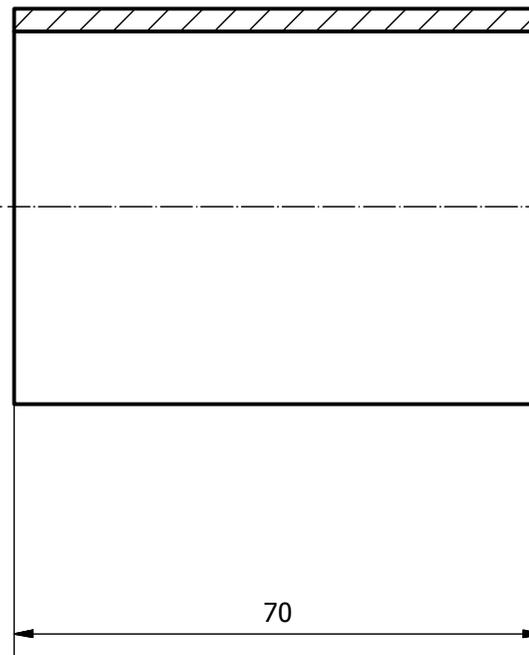
Diseño de Josep Fons Solaz	Dim. en mm	Escala 4:1	Fecha de comprobación 11/01/2015
TFG: Diseño de un motor radial de cinco cilindros. Generación de su prototipo y simulación mecánica	Documento: Planos		
	Casquillo inf. Biela Secundaria		Pieza nº 6



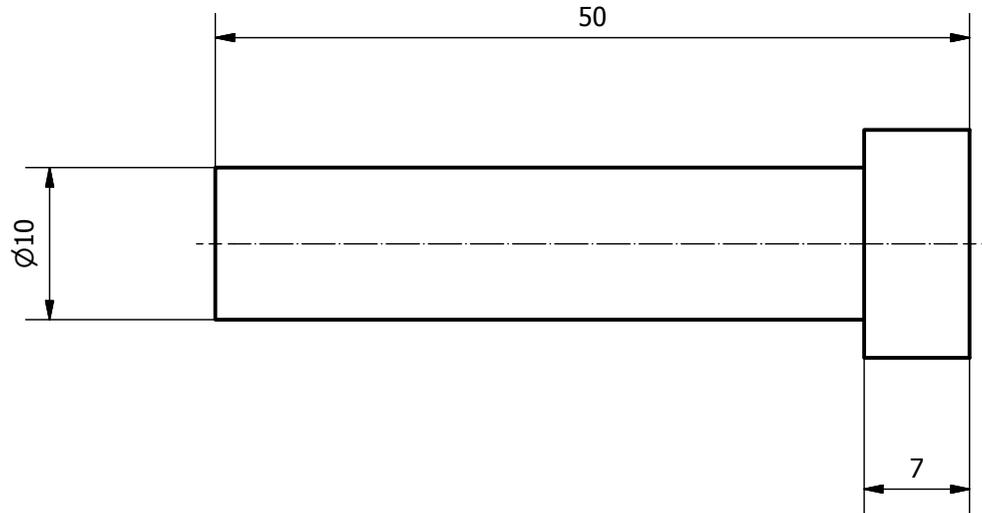
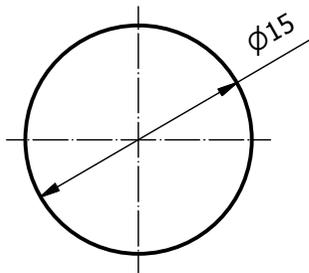
Diseño de Josep Fons Solaz	Dim. en mm	Escala 1:1	Fecha de comprobación 11/01/2015
TFG: Diseño de un motor radial de cinco cilindros. Generación de su prototipo y simulación mecánica	Documento: Planos		
	Eje Principal		Pieza nº 7



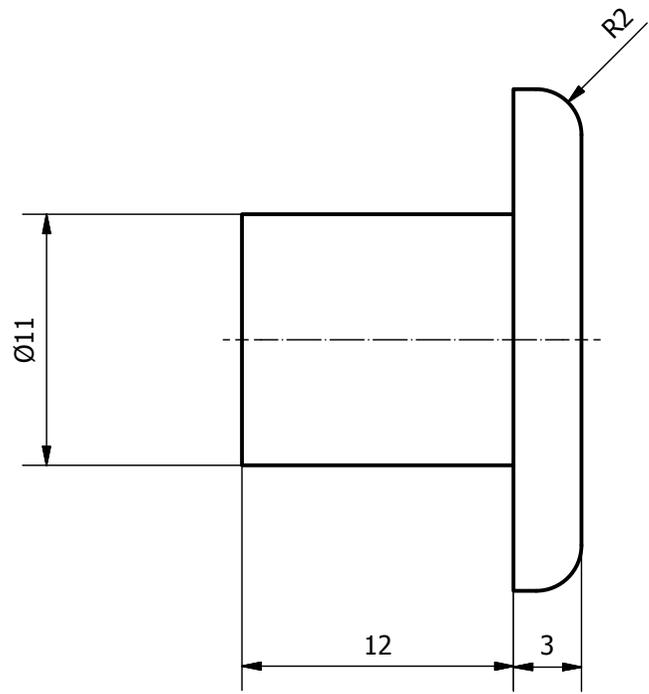
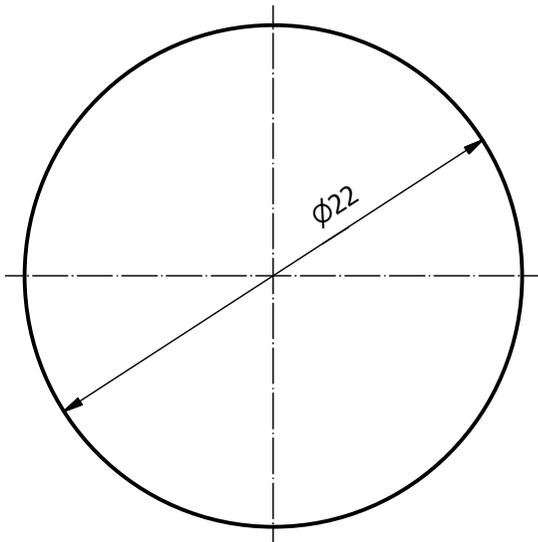
A-A



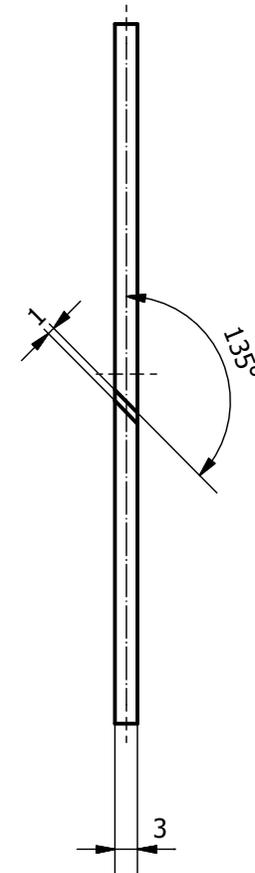
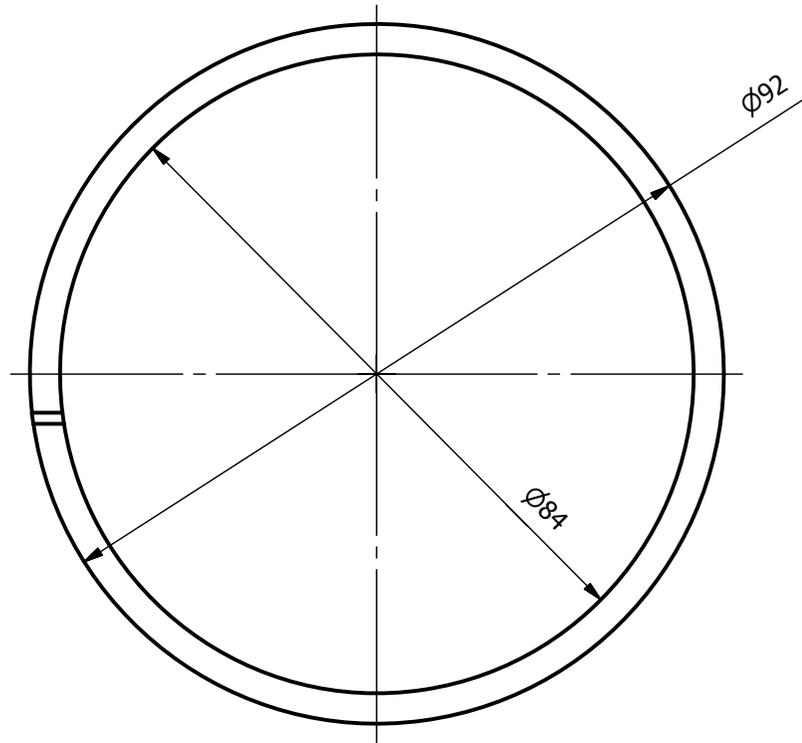
Diseño de Josep Fons Solaz	Dim. en mm	Escala 1:1	Fecha de comprobación 11/01/2015
TFG: Diseño de un motor radial de cinco cilindros. Generación de su prototipo y simulación mecánica	Documento: Planos		
	Casquillo Biela Principal		Pieza nº 8



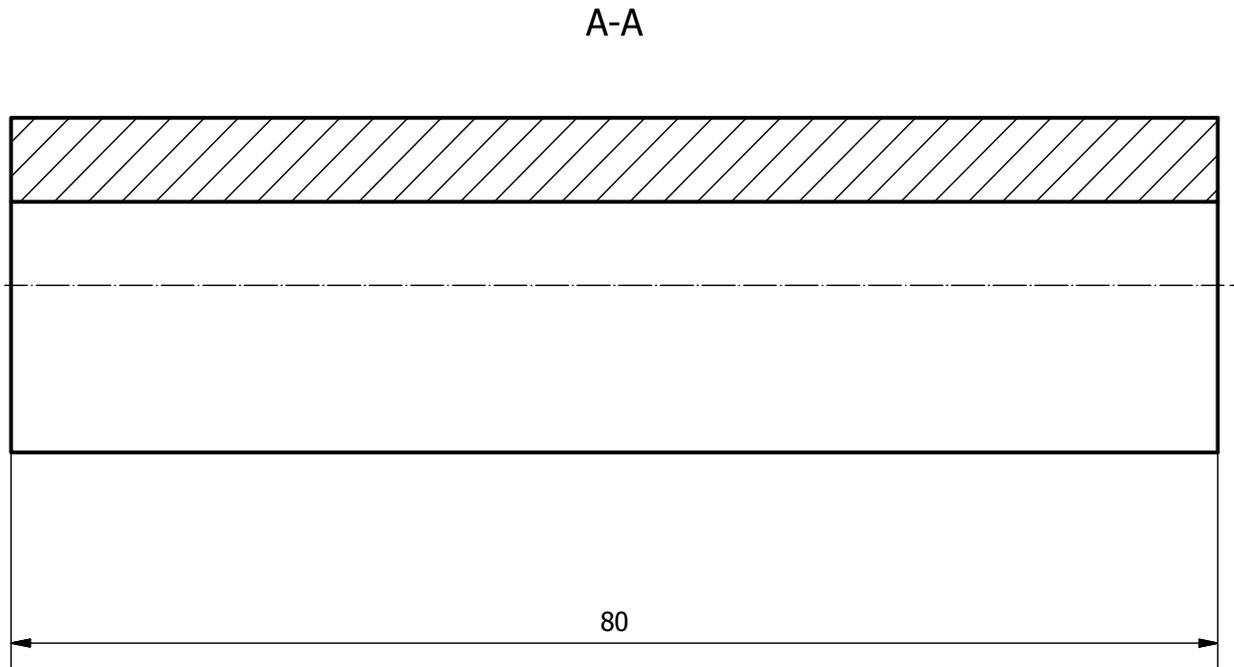
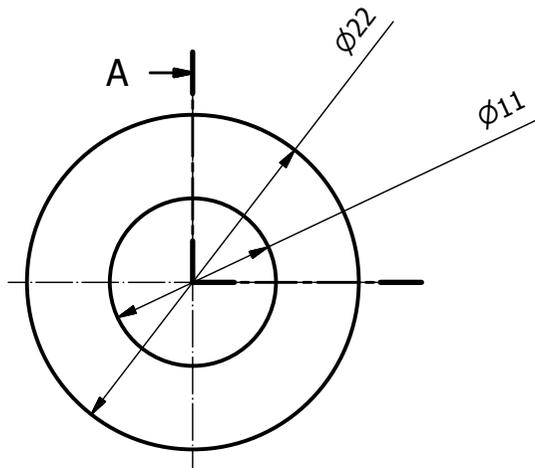
Diseño de Josep Fons Solaz	Dim. en mm	Escala 2:1	Fecha de comprobación 11/01/2015
TFG: Diseño de un motor radial de cinco cilindros. Generación de su prototipo y simulación mecánica	Documento: Planos		
	Pasador		Pieza nº 9



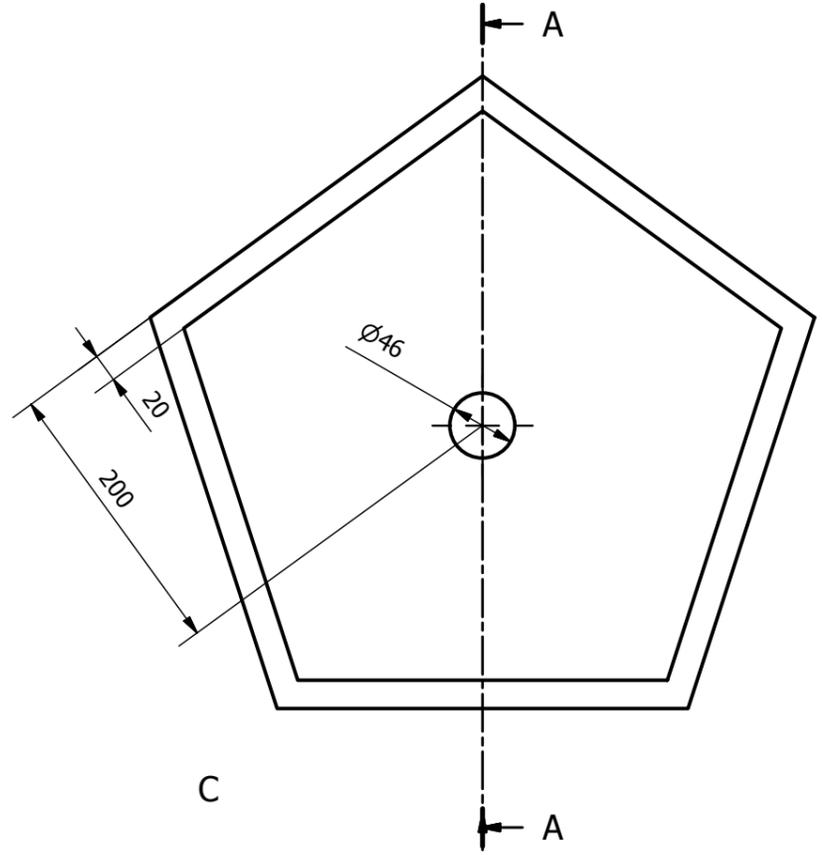
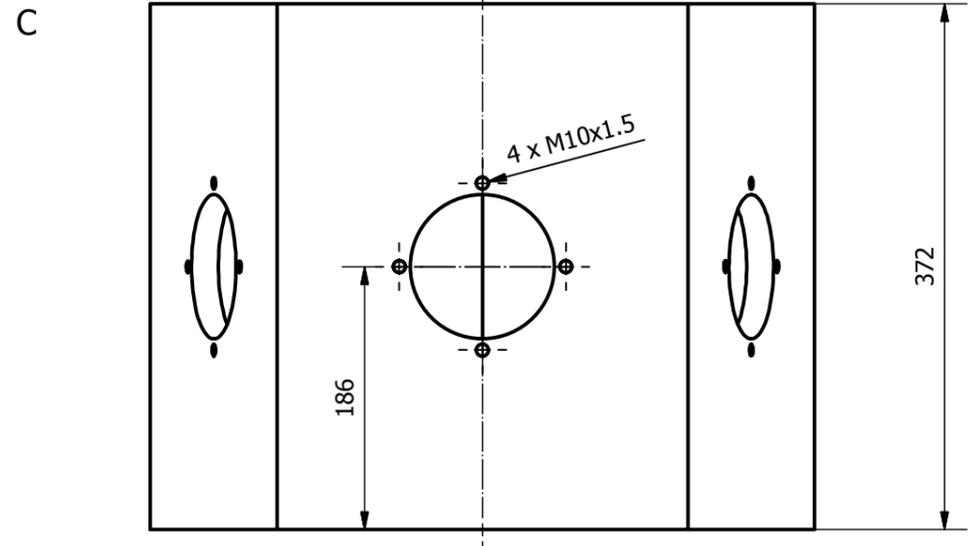
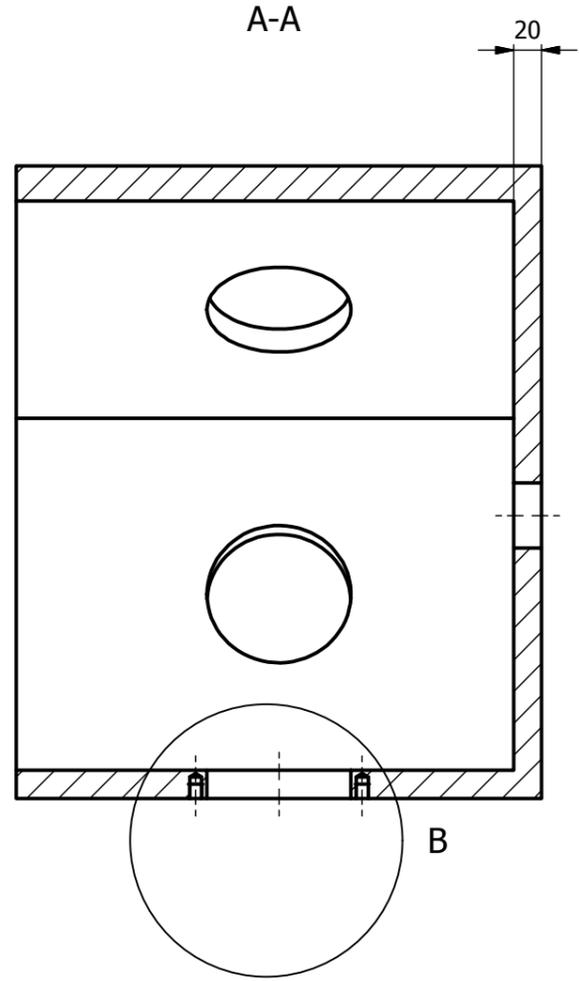
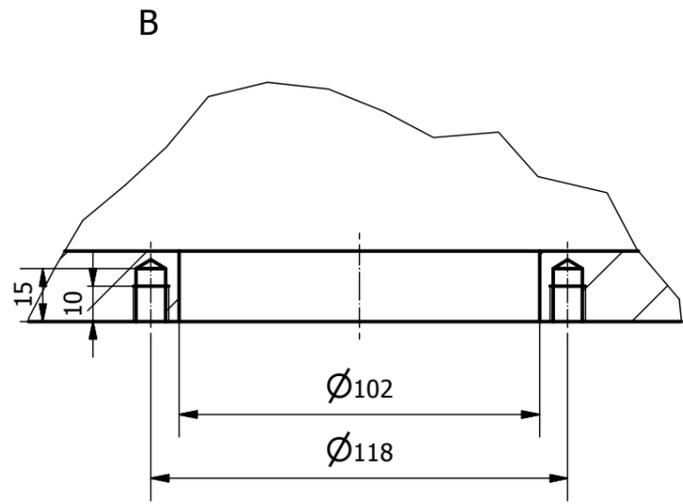
Diseño de Josep Fons Solaz	Dim. en mm	Escala 3:1	Fecha de comprobación 11/01/2015
TFG: Diseño de un motor radial de cinco cilindros. Generación de su prototipo y simulación mecánica	Documento: Planos		
	Taco del Perno del Pistón		Pieza nº 10



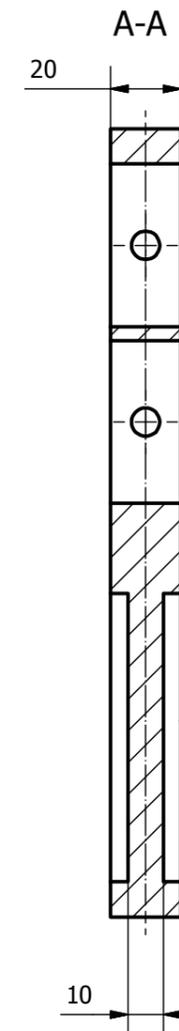
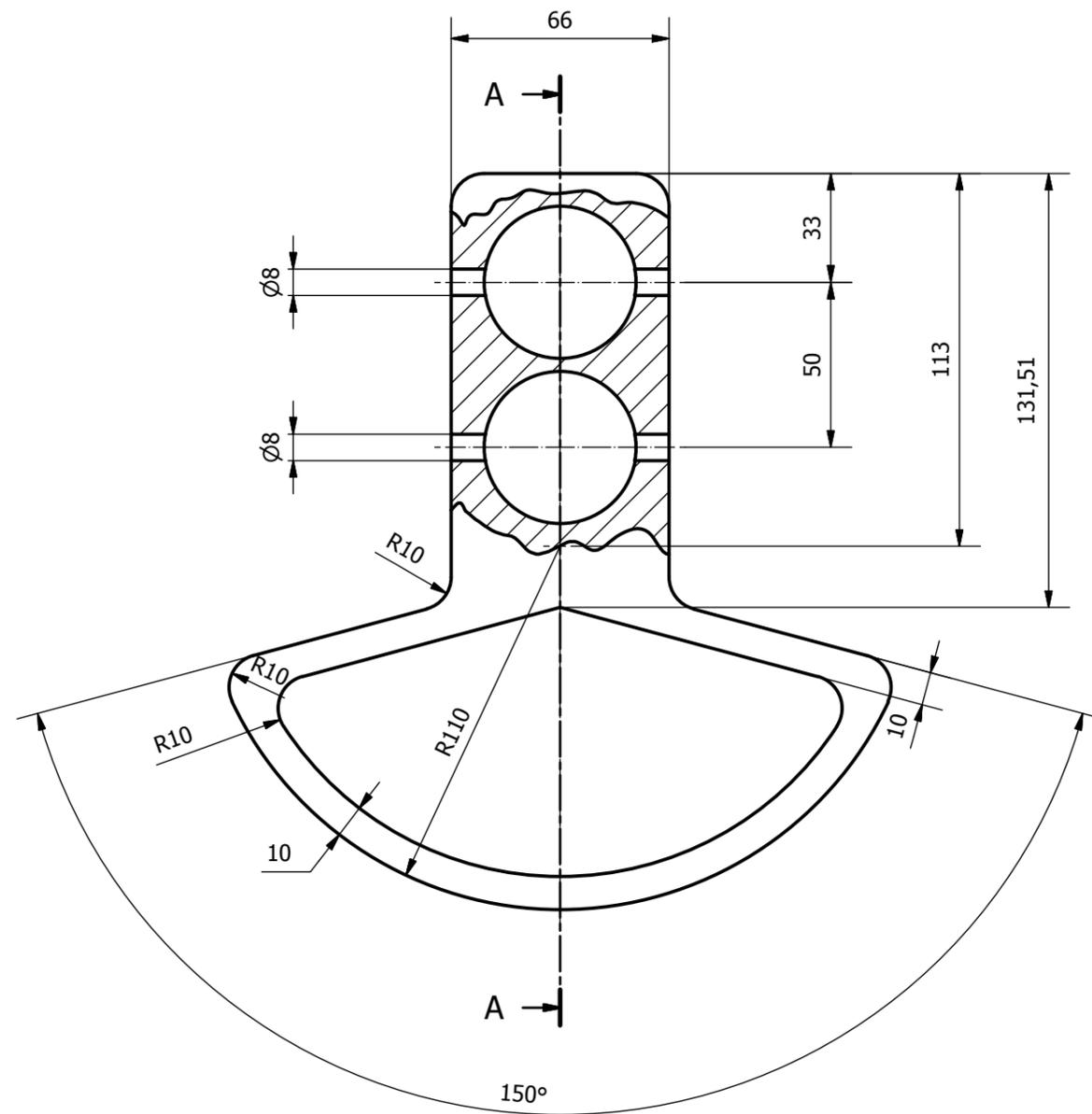
Diseño de Josep Fons Solaz	Dim. en mm	Escala 1:1	Fecha de comprobación 11/01/2015
TFG: Diseño de un motor radial de cinco cilindros. Generación de su prototipo y simulación mecánica	Documento: Planos		
	Anillo del Pistón		Pieza nº 11



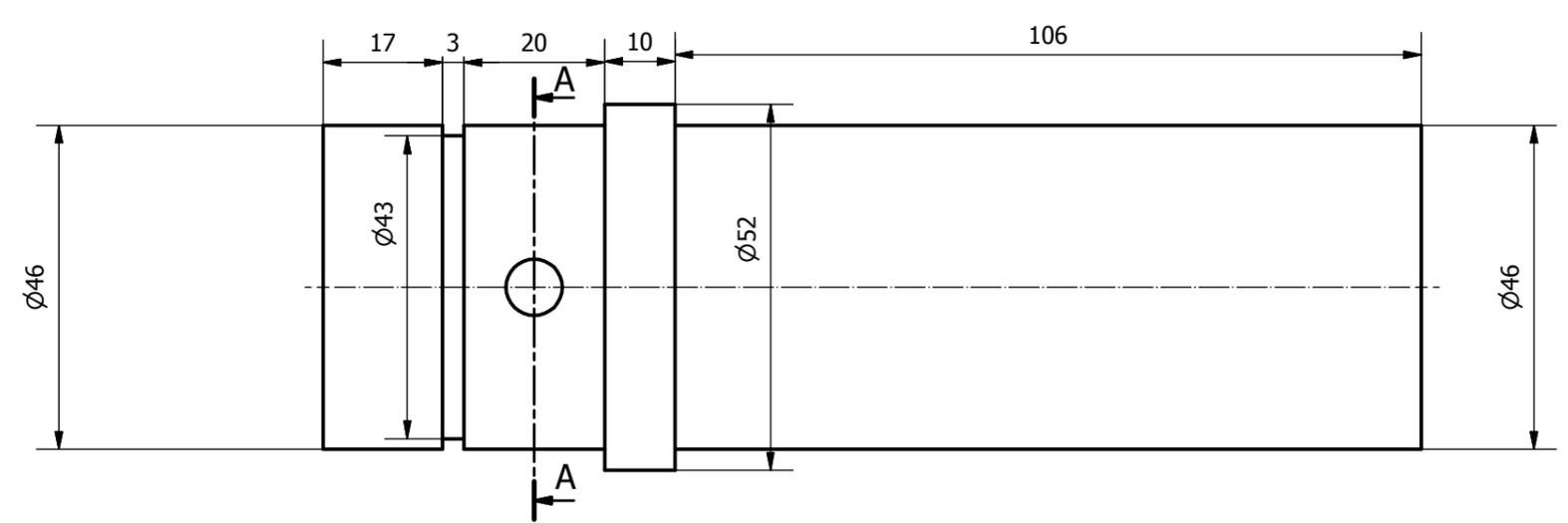
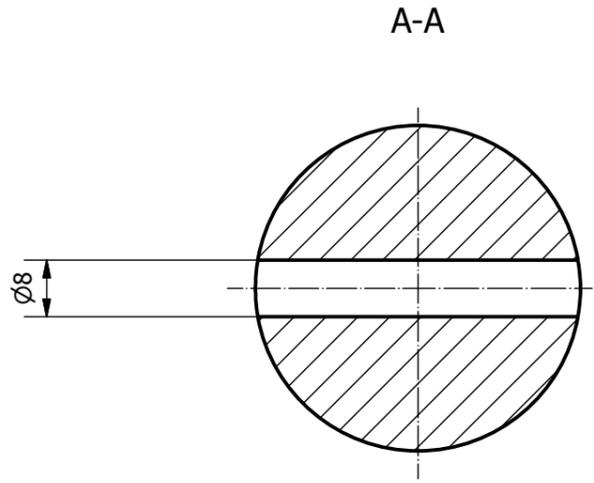
Diseño de Josep Fons Solaz	Dim. en mm	Escala 2:1	Fecha de comprobación 11/01/2015
TFG: Diseño de un motor radial de cinco cilindros. Generación de su prototipo y simulación mecánica	Documento: Planos		
	Casquillo del Pistón	Pieza nº 12	



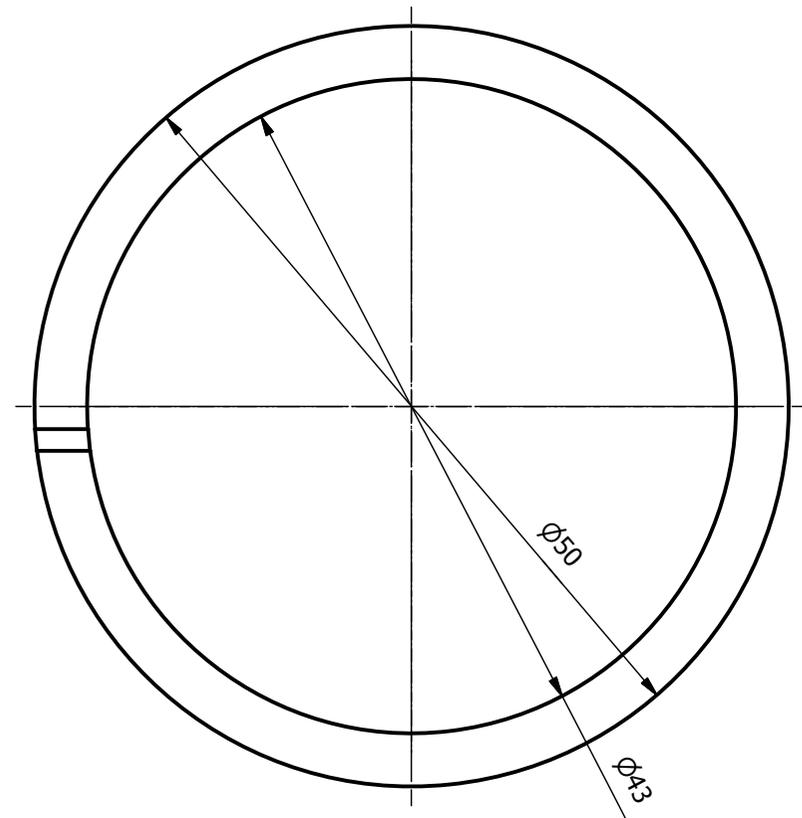
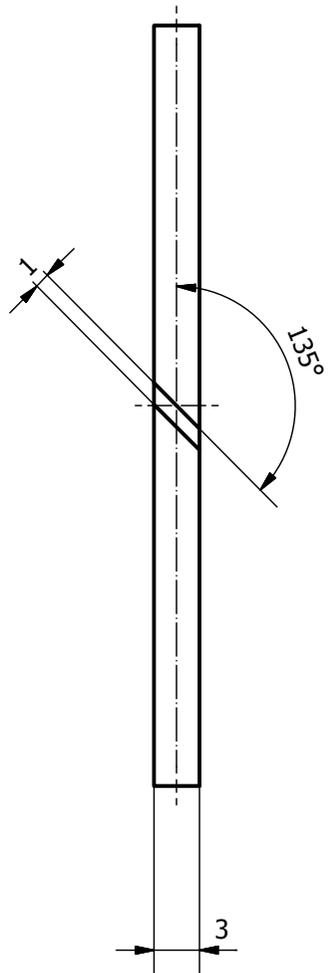
Diseño de Josep Fons Solaz	Dim. en mm	Escala 1:5	Fecha de comprobación 11/01/2015
TFG: Diseño de un motor radial de cinco cilindros. Generación de su prototipo y simulación mecánica		Documento: Planos	
		Bloque Motor	Pieza nº 13



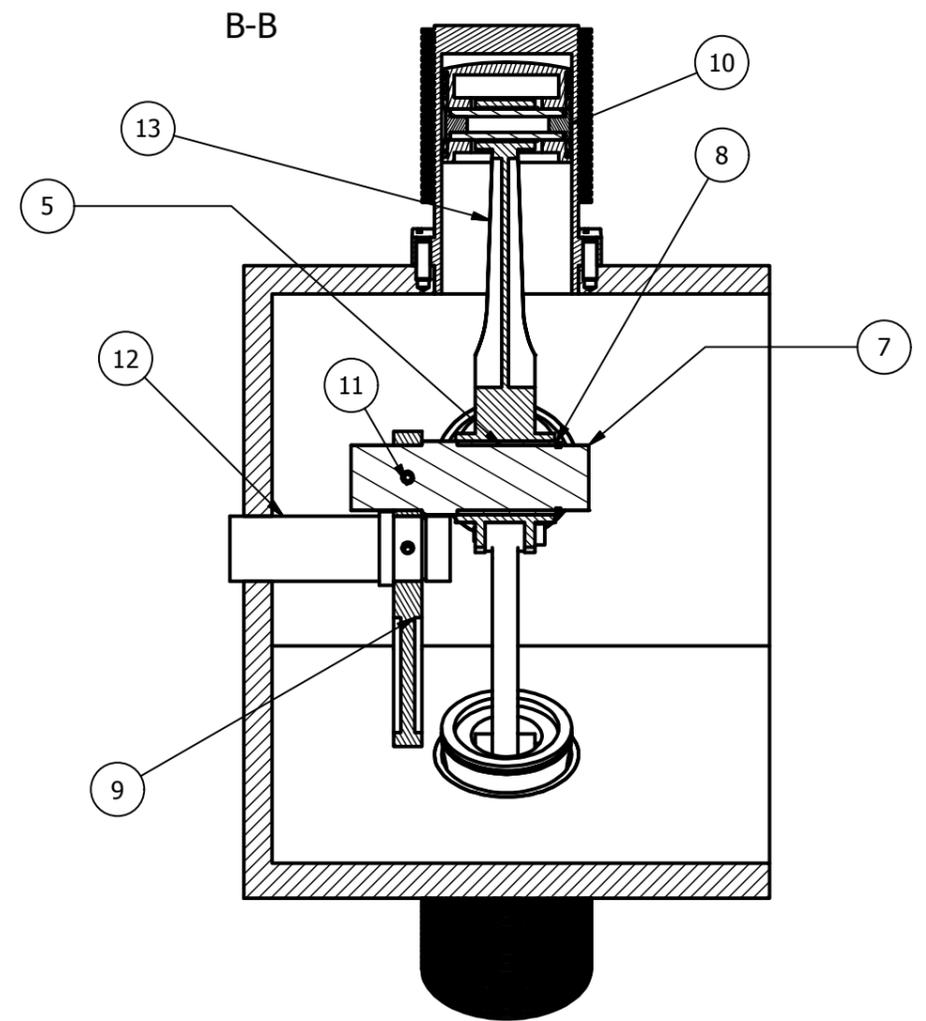
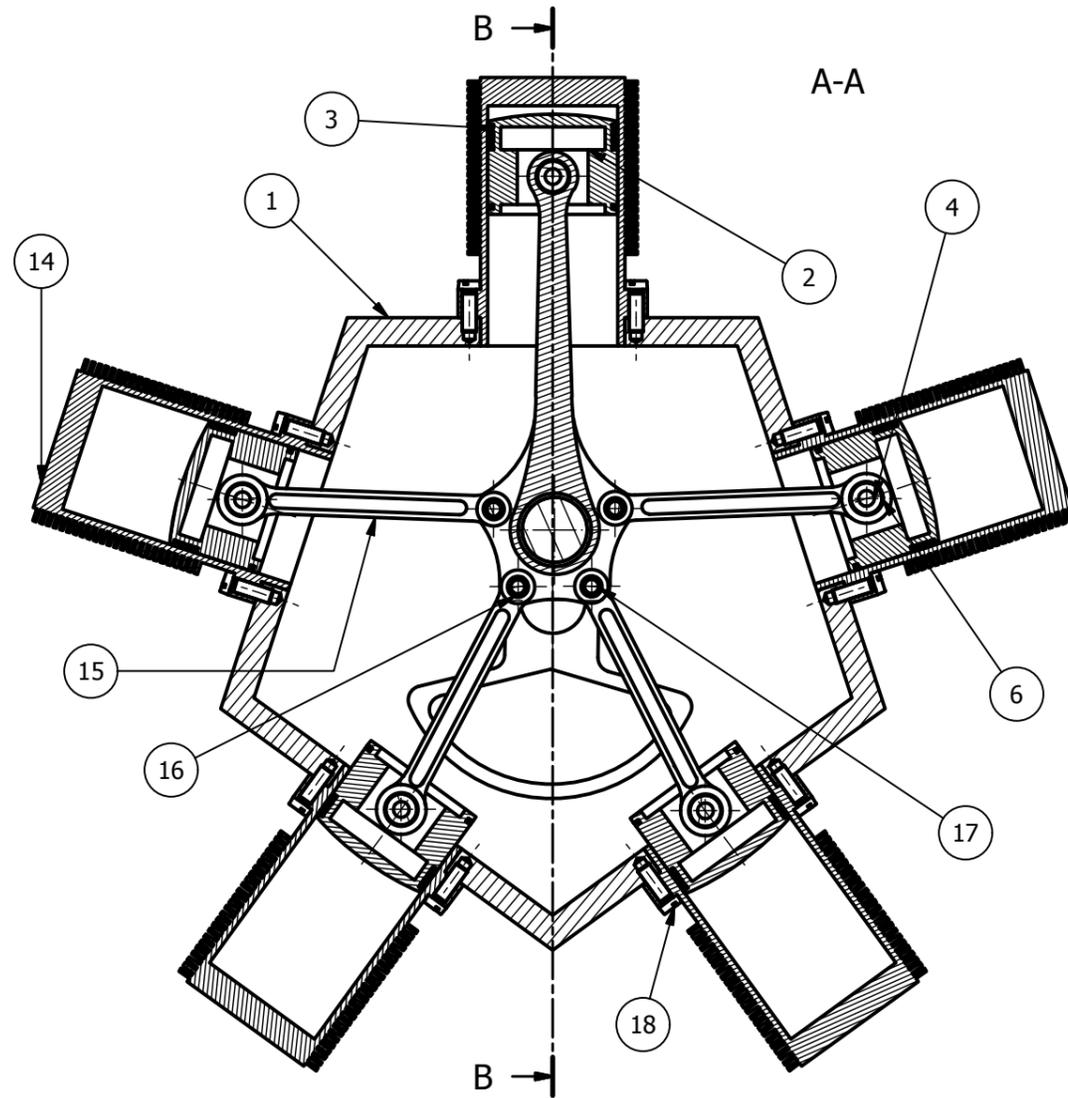
Diseño de Josep Fons Solaz	Dim. en mm	Escala 1:2	Fecha de comprobación 11/01/2015
TFG: Diseño de un motor radial de cinco cilindros. Generación de su prototipo y simulación mecánica	Documento: Planos		
	Volante de Inercia		Pieza nº 14



Diseño de Josep Fons Solaz	Dim. en mm	Escala 1:1	Fecha de comprobación 11/01/2015
TFG: Diseño de un motor radial de cinco cilindros. Generación de su prototipo y simulación mecánica	Documento: Planos		
	Eje Motor		Pieza nº 15



Diseño de Josep Fons Solaz	Dim. en mm	Escala 2:1	Fecha de comprobación 11/01/2015
TFG: Diseño de un motor radial de cinco cilindros. Generación de su prototipo y simulación mecánica	Documento: Planos		
	Anillo del eje	Pieza nº 16	



LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Bloque Motor	
2	5	Pistón	
3	25	Anillo del Pistón	
4	5	Casquillo del Pistón	
5	1	Casquillo Biela Principal	
6	5	Casquillo Sup. Biela Secundaria	
7	1	Eje Principal	
8	1	Anillo del Eje	
9	1	Volante de Inercia	
10	10	Taco del Perno del Pistón	
11	2	ISO 8750 - 8 x 50	Pasador elástico de espiral
12	1	Eje Motor	
13	1	Biela Principal	
14	5	Cilindro	
15	4	Biela Secundaria	
16	4	Casquillo Inf. Biela Secundaria	
17	4	Pasador	
18	20	ISO 1207 - M10 x 30	Tornillos de cabeza cilíndrica ranurada

Diseño de Josep Fons Solaz	Dim. en mm	Escala 0.2:1	Fecha de comprobación 11/01/2015
TFG: Diseño de un motor radial de cinco cilindros. Generación de su prototipo y simulación mecánica		Documento: Planos	
Ensamblaje Radial		Pieza nº 17	