



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

DISEÑO Y RENDERIZACIÓN EN CATIA V5 E IMPRESIÓN 3D DE UN MOTOR RADIAL

Alumno: Raúl Sánchez Nuño

Tutor: Prof. D. Patricio Lupiañez Cruz

Depto.: Depto. de Ingeniería Gráfica, Diseño y
Proyectos

Septiembre, 2022



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Grado en Ingeniería Mecánica

Diseño y renderización en CATIA V5 e impresión 3D de un motor radial

Depto.: Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos

Septiembre, 2022

Tutor:

Fdo.: Patricio Lupiañez Cruz

Alumno:

Fdo.: Raúl Sánchez Nuño

ÍNDICE

1. RESUMEN.....	10
2. ALCANCE Y OBJETIVOS.....	10
3. ANTECEDENTES DEL MOTOR	11
4. ELECCIÓN DE SOFTWARE CAD.....	14
4.1. Tecnologías CAD/CAM	14
4.2. Antecedentes del software CAD	15
4.3. Softwares CAD en el mercado.....	16
4.4. Justificación del software utilizado.....	17
4.5. Módulos utilizados en CATIA.....	17
5. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL MOTOR	18
5.1. Refrigeración, combustible y tipo de motor.....	18
5.2. Relación de compresión y geometría del motor.....	18
5.3. Potencia	19
6. MODELADO DE LAS PIEZAS EN CATIA V5.....	20
6.1. Cilindro	20
6.1.1. Modificaciones respecto a los planos iniciales.....	21
6.1.2. Modelado del cilindro	21
6.2. Culata	24
6.1.3. Cálculos de la culata.....	26
6.1.4. Modelado de la culata.....	28
6.3. Cuerpo	30
6.4.5. Modificaciones respecto a los planos iniciales.....	31
6.4.6. Modelado del cuerpo	31
6.4. Pistón.....	32
6.4.1. Parámetros del pistón	33
6.4.2. Modelado del pistón	34
6.5. Bulón.....	35
6.5.1. Parámetros del bulón	35
6.5.2. Modelado del bulón.....	35
6.6. Segmentos	36
6.6.1. Modelado de los segmentos	36
6.7. Biela madre	37
6.7.1. Modelado de la biela madre	37
6.8. Biela	40

6.8.1. Modelado de la biela	40
6.9. Cono y aspa	41
6.9.2. Modelado del cono	41
6.9.3. Modelado del aspa	42
6.10. Cigüeñal	44
6.10.1. Modificaciones respecto a los planos iniciales.....	45
6.10.2. Modelado del cigüeñal 1	45
6.10.3. Modelado del cigüeñal 2	46
6.11. Válvula de entrada.....	47
6.11.1. Parámetros de la válvula de admisión	47
6.11.2. Modelado de la válvula de admisión	48
6.12. Válvula de escape.....	49
6.12.1. Parámetros de la válvula de escape	49
6.12.2. Modelado de la válvula de escape	49
6.13. Plato de levas.....	50
6.13.1. Modelado del plato de levas	52
6.14. Sistema de engranajes	53
6.14.1. Modelado del sistema de engranajes	53
6.15. Varilla, alojador de varilla, seguidor, palanca y soporte de palanca.....	55
6.16. Manivela de movimiento	56
7. ENSAMBLAJE DEL MOTOR	57
7.1. Procedimientos de ensamblaje	57
7.2. Subconjuntos realizados.....	58
7.1.1. Subconjunto cono-aspas	58
7.1.2. Subconjunto cilindro-palancas	59
7.1.3. Subconjunto del sistema de engranajes	61
7.3. Ensamblaje completo	61
7.4. Tornillería.....	65
8. RENDERIZADO DEL MODELO	67
8.1. Cilindro y cuerpo.....	68
8.2. Culata, pistón y sobre eje	68
8.3. Aspa y cono.....	68
8.4. Cigüeñal 1 y 2	69
8.5. Engranajes 1-2-3	69
8.6. Engranaje 4 y plato de levas.....	69

8.7. Biela madre, biela y muelle.....	70
8.8. Bulones y casquillo de unión	70
8.9. Varilla y alojador de varilla.....	70
8.10. Palanca y soporte de palanca.....	71
8.11. Válvulas y rodillo seguidor	71
8.12. Segmentos	71
8.13. Manivela de movimiento	72
8.14. Subconjunto cono-aspas.....	72
8.15. Subconjunto cilindro-palancas.....	72
8.16. Sistema de engranajes	73
8.17. Motor radial completo.....	73
9. IMPRESIÓN 3D	74
9.1. Características técnicas de la impresora.....	75
9.2. Proceso de impresión	76
10. CONCLUSIONES Y FUTURAS MEJORAS	79
11. Referencias.....	81
12. ANEXOS	86
12.1. Anexo 1: Cálculos del sistema de engranajes	87
12.1.1. Diseño del sistema de engranajes.....	87
12.1.2. Cálculo de los parámetros de los dientes de las ruedas	88
12.2. Anexo 2: Planos del motor radial.....	90

TABLA DE FIGURAS

FIGURA 3.1: Imagen de un motor radial. Se puede ver la distribución de los cilindros con sus correspondientes aletas de refrigeración. Imagen extraída de: (3)	11
FIGURA 3.2: Motor BMW 801. Uno de los motores más utilizados en la aviación entre el 1938 y el 1945. Motor radial de doble estrella y 14 cilindros que llegó a generar 2400 CV de potencia. (4).....	11
FIGURA 3.3: Imagen del motor que hizo volar al primer avión motorizado. Motor de explosión refrigerado con líquido de los hermanos Wright. (6)	12
FIGURA 3.4 A la izquierda: Imagen del primer motor rotativo modelo ‘Le Rhône 9C’, como se aprecia puede confundirse con un motor radial pero lo que gira es el bloque entero incluidos los cilindros (38). A la derecha: Imagen del primer motor radial modelo ‘R-1340 Wasp’, los cilindros se limitan al movimiento de vaivén y es el cigüeñal el que gira tirando de las bielas (39).	12
FIGURA 3.5: imagen de ‘Focke-Wulf 200 Condor’, fue avión oficial de Adolf Hitler y fue capaz de volar 7000 km en 25 horas. (40)	13
FIGURA 4.1: imagen de un diseño de avioneta en CATIA V5 (12).	14
FIGURA 4.2: imagen de un proceso de fabricación mediante tecnología CAM en CATIA V5. (13)	14
FIGURA 4.3: imagen del SAGE primer sistema grafico que localizaba objetos vía radar y los mostraba en una pantalla. (15).....	15
FIGURA 4.4: A la izquierda el primer ‘Sketchpad’ diseñado por E.Lincoln. A la derecha: El ‘lápiz’ que se usaba, con sus partes, para que se plasmar los dibujos del ‘Sketchpad’ al ordenador. (41)	16
FIGURA 4.5: Imagen del logo de Autocad (42).....	16
FIGURA 4.6: Imagen de logo de SolidEdge (45).....	16
FIGURA 4.7: A la izquierda: imagen del logo de Catia (44). A la derecha: imagen del logo de SolidWorks (45).....	17
FIGURA 5.1: Imagen del esquema del motor de cuatro tiempos. (22)	18
FIGURA 5.2: Imagen de la medición del radio del bloque motor completo.	19
FIGURA 6.1: Imagen de ejemplo del cilindro de un motor (26).....	20
FIGURA 6.2: Imagen de un cilindro con aletas de refrigeración. Imagen extraída de la página web de un distribuidor de piezas metálicas de Brasil (11).....	21
FIGURA 6.3: A la izquierda: el sketch utilizado para la realización de la solapa. A la derecha el modelo 3D de la operación realizada	22
FIGURA 6.4: A la izquierda: ‘sketch’ del volumen de revolución. A la derecha: volumen de revolución resultante.....	22
FIGURA 6.5: A la izquierda: sketch utilizado para realizar, de nuevo, la operación ‘Pad’. A la derecha: modelo 3D con la aleta en la parte superior del cilindro.	23
FIGURA 6.6: ventana de configuración del patrón, como se observa, el patrón se repite 8 veces y con una distancia entre planos superiores de la aleta de 5 mm.	23
FIGURA 6.7: imagen del taladro y la ventana donde se configura el roscado del taladro, en este caso M4.	24
FIGURA 6.8: imagen del resultado final del cilindro.....	24
FIGURA 6.9: imagen del corte de una culata con doble árbol de transmisión. La finalidad de esta foto es para que se observe el interior de una culata, los conductos de admisión y escape, las válvulas y el alojamiento de la posible bujía. (28)	25

FIGURA 6.10: cavidad y válvula de admisión, junto a las recomendaciones de diseño para maximizar su rendimiento. (24)	25
FIGURA 6.11: cavidad y válvula de escape, junto a las recomendaciones de diseño para minimizar el contacto de la espiga con los gases de escape, favoreciendo su refrigeración. (24).....	25
FIGURA 6.12: imagen de la bujía que se alojaría en la culata. Tiene una métrica $\frac{1}{4}$ -32. (29)	26
FIGURA 6.13: A la izquierda: ‘sketch’ de algunos parámetros comentados anteriormente para la construcción de la cavidad de admisión. A la derecha: diámetro de entrada de los gases a la cavidad.	27
FIGURA 6.14 A la izquierda el ‘sketch’ auxiliar para la construcción de la cavidad de salida. A la derecha: diámetro de salida de los gases de escape.	28
FIGURA 6.15: imagen de la herramienta ‘Removed Multi-Sections Solid’ y del resultado de la operación.	28
FIGURA 6.16: imagen de la culata con los taladros para unir cilindro y culata, junto con las cavidades de salida y entrada de gases.	29
FIGURA 6.17: corte trasversal de la culata donde aparecen los conductos de escape y admisión y los alojamientos de las válvulas (derecha admisión e izquierda escape)..	29
FIGURA 6.18: imagen de la culata y todas las cavidades que se han modelado en su interior.....	30
FIGURA 6.19: imagen del cuerpo de un motor radial de 7 cilindros. (31)	30
FIGURA 6.20: imagen de la extrusión del bloque completo.....	31
FIGURA 6.21: imagen del vaciado y la extrusión del cilindro por donde pasará el cigüeñal.....	31
FIGURA 6.22: imagen de los alojamientos de los cilindros y del paso del cigüeñal redondeado.....	32
FIGURA 6.23: resultado final del cuerpo.	32
FIGURA 6.24: imagen del pistón donde se pueden ver todas sus partes. (33).....	33
FIGURA 6.25: ‘Sketch’ usado en la primera operación del modelado.	34
FIGURA 6.26: imagen del modelado final del pistón.	35
FIGURA 6.27: esquema de las dimensiones básicas del bulón. (23)	35
FIGURA 6.28: resultado final del bulón.....	36
FIGURA 6.29: esquema resumen de los tipos de segmentos usados. El segmento de fuego es un segmento de estanqueidad con propiedades térmicas aún más especiales que el resto de segmentos de estanqueidad. (23).....	36
FIGURA 6.30: imagen del segmento de estanqueidad, la diferencia con el rascador es la profundidad de la extrusión.	37
FIGURA 6.31: representación de una biela madre conectada al resto de bielas del motor. (36).....	37
FIGURA 6.32: imagen del ‘sketch’ de la biela madre.	38
FIGURA 6.33: ‘sketch’ del vaciado de la parte central de la biela.....	38
FIGURA 6.34: diferentes maneras de ver un ‘sketch’	39
FIGURA 6.35: ‘sketch’ que se utiliza para disminuir el cambio tan brusco de sección entre cabeza y cuerpo de biela madre.	39
FIGURA 6.36: resultado final de la biela madre con todas sus operaciones.	39
FIGURA 6.37: ‘sketch’ utilizado para el modelado del cuerpo de la biela.	40

FIGURA 6.38: a la izquierda: ‘sketch’ de la extrusión de los perfiles que sobresalen en la zona cercana a la conexión con la biela madre. A la derecha: ‘sketch’ del vaciado modelado para darle la forma final deseada.	40
FIGURA 6.39: imagen del resultado del modelado de la biela.	41
FIGURA 6.40: volumen de revolución junto al ‘sketch’ utilizado.	42
FIGURA 6.41: resultado del modelado del cono del motor.	42
FIGURA 6.42: modelado del aspa a partir del cono, usando la herramienta ‘Multi-Sections Solid’, cuyos parámetros aparecen a la derecha.	43
FIGURA 6.43: operación booleana de ‘Remove’ eliminando el aspa que se encuentra en el interior del cono quedando el perfil deseado con la misma curvatura que la cara de revolución del cono.	43
FIGURA 6.44: resultado final del modelado del aspa.	44
FIGURA 6.45: cigüeñal típico de un MCIA donde se aprecian perfectamente las excentricidades y los contrapesos. (39)	44
FIGURA 6.46: cigüeñal típico de motor radial, se aprecia la cavidad donde iría alojada la biela madre. (39)	45
FIGURA 6.47: imagen del resultado de cómo deben quedar acoplados los cigüeñales. A la izquierda el cigüeñal 1 y a la derecha el cigüeñal 2. En la parte central excéntrica debe ir el casquillo con los taladros.	45
FIGURA 6.48: dos primeras operaciones del cigüeñal, en naranja el cuerpo de revolución creado.	46
FIGURA 6.49: a la izquierda el ‘sketch’ del contrapeso del cigüeñal. A la derecha el resultado tras modelar los taladros, las extrusiones y los redondeos ya nombrados. .	46
FIGURA 6.50: modelado del cigüeñal 2 con el eje del mismo diámetro más extendido.	47
FIGURA 6.51: distintas disposiciones de válvulas y árbol de levas.....	47
FIGURA 6.52: imagen donde se obtendrán las recomendaciones de modelado de la válvula de admisión.	48
FIGURA 6.53: imagen de la primera operación de revolución.	48
FIGURA 6.54: modelado de la válvula de admisión.	49
FIGURA 6.55: imagen de donde se extraerán las dimensiones recomendadas para el diseño de la válvula de escape.	49
FIGURA 6.56: modelado de la válvula de escape.	50
FIGURA 6.57: imagen del sistema de distribución habitual en los motores, el árbol de levas. (41).....	50
FIGURA 6.58: sistema de distribución junto con bielas y pistones. (36).....	50
FIGURA 6.59: esquema de la distribución variable de las válvulas en función del momento del ciclo termodinámico.[46]	51
FIGURA 6.60: a la izquierda: ‘spline’ utilizada para crear la leva junto con la primera extrusión. A la derecha: las levas del primer disco junto con la unión entre discos.	52
FIGURA 6.61: imagen de ambos platos de levas junto con los redondeos entre plato y unión.	52
FIGURA 6.62: modelo final del plato de levas.....	53
FIGURA 6.63: a la izquierda: ‘sketch’ del diente del engranaje 1. A la derecha: el modelado final del engranaje 1 junto con el agujero donde pasará el cigüeñal.	53

FIGURA 6.64: a la izquierda: ‘sketch’ del diente del engranaje 2. A la derecha: el modelado final del engranaje 2 junto con el alojamiento del engranaje 3.	54
FIGURA 6.65: a la izquierda: ‘sketch’ del diente del engranaje 3. A la derecha: el modelado final del engranaje 3.....	54
FIGURA 6.66: a la izquierda: ‘sketch’ del diente del engranaje 4. A la derecha: el modelado final del engranaje 4.....	55
FIGURA 6.67: a la izquierda: alojador de la varilla. En el centro: palanca. A la derecha: seguidor.....	55
FIGURA 6.68: a la izquierda: soporte de palanca. A la derecha: varilla.....	56
FIGURA 6.69: manivela de movimiento	56
FIGURA 7.1: restricción de coincidencia entre el eje del saliente del cono y el taladro del aspa.	58
FIGURA 7.2: ventana donde aparece la restricción y se puede configurar	58
FIGURA 7.3: a la izquierda: vista explosionada del subconjunto cono-aspas. A la derecha: vista isométrica del subconjunto cono-aspas.	59
FIGURA 7.4: ranura en el pistón para añadir circlips.	60
FIGURA 7.5: corte donde se muestra la situación centrada de bulón, sobre eje y biela.	60
FIGURA 7.6: a la izquierda: vista explosionada del subconjunto cilindro-palancas. A la derecha: vista isométrica del subconjunto cilindro-palancas.....	60
FIGURA 7.7: a la izquierda: vista explosionada del sistema de engranajes. A la derecha: vista isométrica del tren de engranajes ensamblado.	61
FIGURA 7.8: imagen de los dientes de las ruedas 1 y 2 en contacto simulando el comportamiento dinámico del tren de engranajes.	61
FIGURA 7.9: a la izquierda: las tres componentes de la primera unión del conjunto motor. A la derecha: vista del primer ensamble del motor.....	62
FIGURA 7.10: subconjunto cilindro-palancas ensamblado con el cigüeñal 1 y con el cuerpo del motor.	62
FIGURA 7.11: todos los cilindros ensamblados junto con el cigüeñal y el cuerpo del motor (se ha ocultado el subconjunto cono-aspas para facilitar la visión de las bielas).	63
FIGURA 7.12: a la izquierda: vista de los cigüeñales unidos en su posición correcta gracias a la restricción de paralelismo de los ejes de los taladros que se muestran en la imagen derecha.	63
FIGURA 7.13: a la izquierda la incorporación del plato de levas y a la derecha la incorporación del sistema de engranajes.	63
FIGURA 7.14: arriba: vista del conjunto al completo con la incorporación de la manivela de movimiento y el casquillo de unión. Abajo: vista explosionada del conjunto dividido por subconjuntos y los nuevos componentes añadidos.	64
FIGURA 7.15: a la izquierda: pestaña ‘Tools’ donde se abrirá el catálogo. A la derecha: la ventana del catálogo donde se escogerá el tipo de elemento de unión, para este ejemplo, se abrirá la sección ‘Screws’	65
FIGURA 7.16: toda la gama de métricas y longitudes de perno disponible en este tipo de tornillo.	65
FIGURA 8.1: activación de la herramienta de renderizado	67

FIGURA 8.2: a la izquierda: ventana donde se aplica el material a la pieza. A la derecha ventana de configuración de la escena, en el apartado ‘Background’ se inserta una imagen de color negro.....	67
FIGURA 8.3: cilindro y cuerpo del motor renderizaos.....	68
FIGURA 8.4: renderizado de la culata, sobre eje y pistón.	68
FIGURA 8.5: renderizado del cono y el aspa.	68
FIGURA 8.6: renderizado de los cigüeñales del motor.	69
FIGURA 8.7: engranajes 1, 2 y 3 renderizados.	69
FIGURA 8.8: renderizado del cuarto engranaje junto con el plato de levas.....	69
FIGURA 8.9: biela en estrella, biela y muelle renderizados.....	70
FIGURA 8.10: bulón biela-biela madre, bulón pistón-biela y casquillo de unión.	70
FIGURA 8.11: renderizado de alojador de varilla y varilla.....	70
FIGURA 8.12: palanca y soporte de palanca renderizados.	71
FIGURA 8.13: renderizado de válvulas de admisión y escape junto con el rodillo seguidor.	71
FIGURA 8.14: segmento de estanqueidad y segmento rascador renderizados. ...	71
FIGURA 8.15: manivela de movimiento renderizada.	72
FIGURA 8.16: renderizado del subconjunto cono-aspas.....	72
FIGURA 8.17: subconjunto cilindro-palancas renderizado.....	72
FIGURA 8.18: sistema de engranajes renderizado.	73
FIGURA 8.19: renderizado final de todo el conjunto del motor radial.	73
FIGURA 9.1: a la izquierda: aplicación de la impresión 3D en el sector bucodental (61). A la derecha: elementos conductores del sector de la electrónica impresos en 3D. (62)	74
FIGURA 9.2: a la izquierda: aplicación de la impresión 3D en el sector de la medicina (59). A la derecha: aplicación de la impresión 3D en el sector industrial como prototipado. (60)	74
FIGURA 9.3: modelo 3D e imagen real de la impresora utilizada.	75
FIGURA 9.4: filamento PETG de color negro con el que se construyó el pistón. 76	
FIGURA 9.5: a la izquierda una bobina de ABS de color blanco con la que se hizo el cuerpo del motor. A la derecha PLA bobina que se utilizó para imprimir la biela y el bulón.	76
FIGURA 9.6: en la parte inferior de la imagen aparece la cama de la impresora algo rayada y dañada.	77
FIGURA 9.7: a la izquierda el ensamblaje de todas las piezas impresas. A la derecha el interior del pistón donde se ve el ajuste entre la biela madre, el sobre eje y el bulón de pistón.	77
FIGURA 9.8: en esta figura se aprecia el cuerpo del motor, y se observan las imperfecciones comentadas anteriormente.....	78
FIGURA 10.1: simulación de flujos en la cámara de combustión mostrando los vectores seguidos por el aire. (44)	79
FIGURA 10.2: método de elementos finitos aplicado a la biela de un motor (45).	80
FIGURA 12.1: Esquema del sistema de engranajes utilizado en el motor, como se puede observar el engranaje Z1 y el Z4 están conectados entre sí mediante el cigüeñal.	87

FIGURA 12.2: parámetros básicos para la construcción del diente del engranaje.

..... 88

1. RESUMEN

En este proyecto se ha realizado el diseño de todas las piezas de un motor radial en estrella mediante el software CAD CATIA V5. Posteriormente, todas las piezas nombradas se ensamblaron para formar finalmente el motor.

Una vez modelado el motor, se ha realizado una recreación en 3D de cada una de las piezas y del conjunto ensamblado para aportar una visión aún más cercana de la pieza real de una manera rápida y sencilla.

Para finalizar, se han impreso en 3D algunas piezas del motor para que, gracias al prototipado, se pueda apreciar una solución real de las piezas diseñadas y se podrá coger conciencia del resultado final que se podría obtener, bien a modo de maqueta, o bien a la hora de llevar este proyecto a la fabricación.

Además, se habla del contexto histórico del motor y del software utilizado. Exponiendo así, la decisión de usar CATIA V5 y de realizar este motor radial.

2. ALCANCE Y OBJETIVOS

El proyecto tiene tres objetivos principales:

Por una parte, modelar un motor radial mediante software CAD, por otra parte, recrear virtualmente el diseño con el mismo software y finalmente plasmar mediante impresión 3D un modelo a escala de algunas piezas creando así, un prototipo.

El diseño de este motor viene de la mano de los planos encontrados en (1). Sin embargo, en estos planos solo se muestran algunas piezas, el resto de piezas se han tenido que diseñar en función de la geometría tan limitada del motor y de las necesidades del mismo para su funcionamiento. Esta fase de diseño hace que el que la experimenta, desarrolle una visión y una continua adaptabilidad a todos los contratiempos que hacen que sume experiencia y ponga aún más en valor el trabajo realizado.

En cuanto al alcance del proyecto, como se ha comentado previamente, el modelado, renderizado y posterior impresión 3D son los únicos objetivos del proyecto, quedando a un lado el diseño desde el punto de vista ingenieril. No se hablará en profundidad de métodos de fabricación, cálculos estructurales de ninguna de las piezas del motor, transmisión de calor, simulación de flujos o la dinámica de levas entre otros muchos temas que abarca el diseño de un motor radial.

El acotar tanto el proyecto, hace que se tengan que tomar decisiones exclusivamente para el diseño geométrico pasando por alto algunos de los temas ya nombrados, aunque, se propondrán posibles mejoras para proyectos futuros.

3. ANTECEDENTES DEL MOTOR

El motor que se trata en este proyecto es un motor en estrella, es decir, una tipología del conocido motor de combustión interna alternativo. Se le llama radial por la disposición de sus cilindros, orientados desde el cigüeñal hacia el exterior como las agujas de un reloj (2).



FIGURA 3.1: Imagen de un motor radial. Se puede ver la distribución de los cilindros con sus correspondientes aletas de refrigeración. Imagen extraída de: (3)

Esta disposición hace que se reduzca el tamaño total y que se convierta en un motor muy económico y práctico, lo que fue suficiente para convertirse en uno de los motores más usados en el sector aeroespacial desde principios hasta mediados del siglo XX.

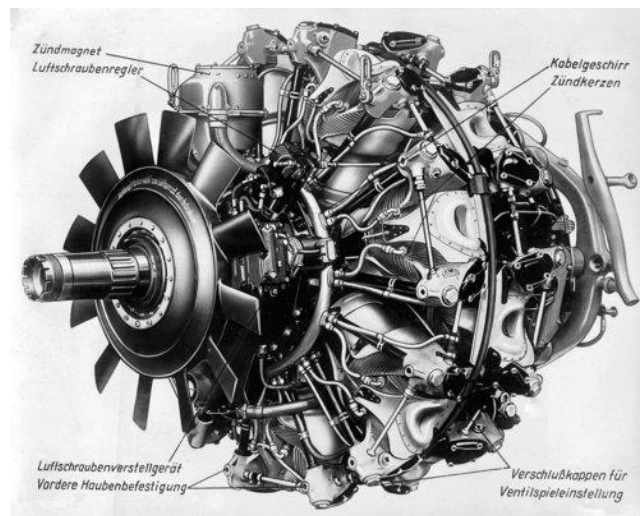


FIGURA 3.2: Motor BMW 801. Uno de los motores más utilizados en la aviación entre el 1938 y el 1945. Motor radial de doble estrella y 14 cilindros que llegó a generar 2400 CV de potencia. (4)

Para hablar del motor radial se debería nombrar el comienzo de los motores de explosión y la transición para cambiar de los motores de vapor tan pesados y costosos a los de explosión con más rendimiento y más económicos (4)

A finales del siglo XIX las únicas máquinas que generaban la suficiente potencia como para elevar un avión eran las máquinas de vapor, pero tenían el inconveniente de la relación potencia-peso. Por ello, en 1903 el primer avión motorizado utilizó un motor de

explosión fabricado expresamente para la aviación y que fue diseñado por los hermanos Wright, el avión se llamó ‘Wright Flyer I’ (5).

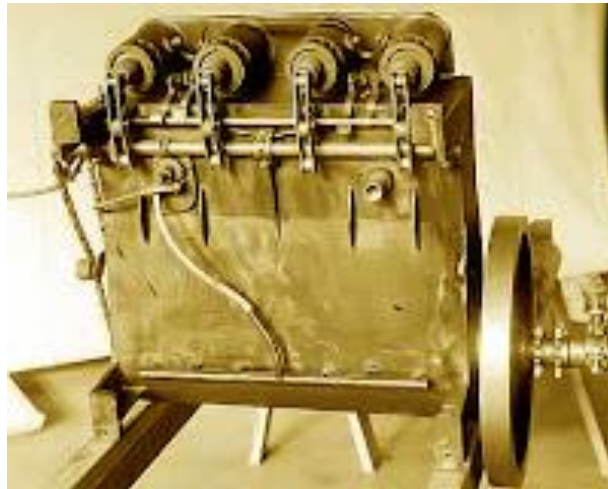


FIGURA 3.3: Imagen del motor que hizo volar al primer avión motorizado. Motor de explosión refrigerado con líquido de los hermanos Wright. (6)

Finalizando el 1921 surge la idea de usar motores radiales como alternativa a los motores rotativos que se estaban utilizando tras la Primera Guerra Mundial, motores ciertamente radiales pero que hacían girar los pistones perdiendo así rendimiento y fiabilidad.

Esta idea viene dada por motivos de fiabilidad y resistencia. Los motores rotativos usaban fluidos para la refrigeración de los cilindros, si dicho fluido sufriese cualquier fuga por algún daño en el combate, el motor no tardaría en fundirse.

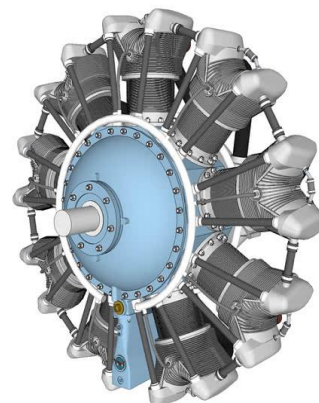
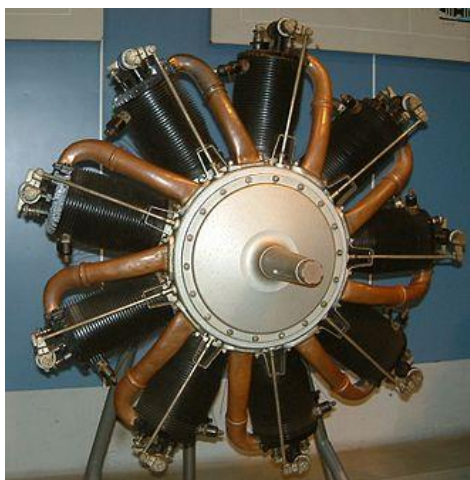


FIGURA 3.4 A la izquierda: Imagen del primer motor rotativo modelo ‘Le Rhône 9C’, como se aprecia puede confundirse con un motor radial pero lo que gira es el bloque entero incluidos los cilindros (38). A la derecha: Imagen del primer motor radial modelo ‘R-1340 Wasp’, los cilindros se limitan al movimiento de vaivén y es el cigüeñal el que gira tirando de las bielas (39).

El motor radial usa aire para su refrigeración ya que tiene un área frontal muy grande y sumado a las aletas de los cilindros se lograba una buena refrigeración. Si este motor recibiese algún tipo de daño en algún cilindro durante el combate podría seguir funcionando, aunque con menor rendimiento, ya que no afecta al resto del motor (7).

No sería hasta 1929 cuando, el ingeniero alemán Félix Wankel patentó el primer motor rotativo conocido por ‘Wankel’ (8). Tras la Primera Guerra Mundial se estancó el avance de los motores radiales y se consideraba la opción de usar los, ya inventados en 1890, motores en V, pero los motores radiales seguían aportando una mayor relación potencia-peso y es por eso, junto con la llegada de la Segunda Guerra Mundial, cuando volvió a resurgir el avance de los motores radiales. (9)



FIGURA 3.5: imagen de ‘Focke-Wulf 200 Condor’, fue avión oficial de Adolf Hitler y fue capaz de volar 7000 km en 25 horas. (40)

Fueron muchos, como el ‘Condor’, los aviones en la Segunda Guerra Mundial los que usaban de manera eficiente el motor radial, pero si se tuviera que destacar un motor sería el BMW 801, ya nombrado anteriormente, por su alto rendimiento con respecto al resto de motores y por su baja resistencia aerodinámica. (8)

Pasada la Segunda Guerra Mundial, se empezaron a desarrollar nuevas maneras de propulsión en la aviación como el motor a reacción y a implementar modificaciones a los motores existentes como la turbo-sobrealimentación que le daba esa potencia extra.

A día de hoy, los motores radiales han quedado prácticamente relegados por los turboreactores ya que acapararon toda la atención debido a sus prestaciones (aún, inventándose prácticamente en la misma época, 1930), mejores que las del motor radial (10).

4. ELECCIÓN DE SOFTWARE CAD

4.1. Tecnologías CAD/CAM

Diseño asistido por ordenador y fabricación asistida por ordenador son los significados, respectivamente, de las siglas de CAD y CAM. La tecnología CAD se usa para el diseño de todo tipo de productos y piezas y para la generación de todos los planos necesarios para su posterior fabricación.

El software CAM pretende simular la fabricación de piezas mediante determinada maquinaria industrial, por ejemplo, esta tecnología tiene una gran utilidad en el mecanizado CNC. Son tecnologías que suelen estar muy conectadas entre sí, una vez se diseña la pieza en CAD se traspasa a CAM para su posterior fabricación de manera rápida y sencilla.

Los sectores que más utilizan estas tecnologías son muy variados, desde sectores como el aeronáutico, automotriz o el de la construcción hasta el sector textil o el arte. Esto es debido a su facilidad de uso, su rapidez a la hora de aportar resultados y la gran precisión y proximidad a la realidad (11).

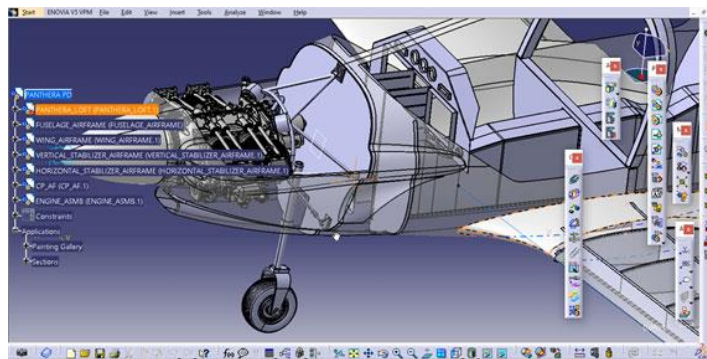


FIGURA 4.1: imagen de un diseño de avioneta en CATIA V5 (12).

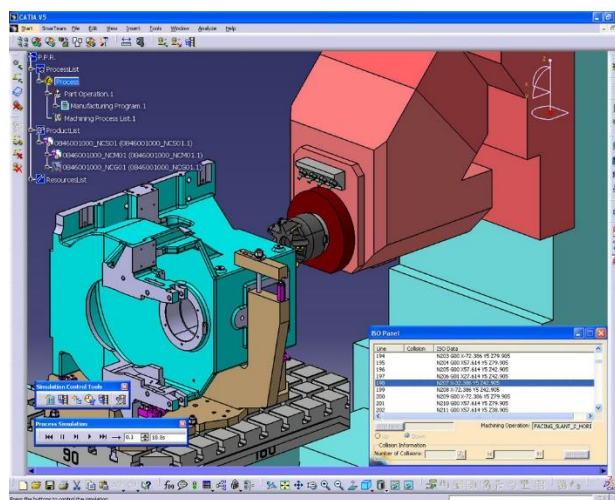


FIGURA 4.2: imagen de un proceso de fabricación mediante tecnología CAM en CATIA V5. (13)

Como breve comentario este tipo de tecnología incluye el software CAE que implica la simulación y una fase de pruebas, como, por ejemplo, a fatiga, resistencia elástica o a la temperatura de las piezas diseñadas obteniendo unos muy precisos resultados muy útiles a la hora de predecir el comportamiento de nuestras piezas en la realidad.

4.2. Antecedentes del software CAD

No fue hasta el siglo XVI y XVII cuando la geometría descriptiva tuvo su gran desarrollo. A raíz de este desarrollo, y pasando acontecimientos como en el siglo XX la introducción del tecnógrafo o la ya mencionada Segunda Guerra Mundial, se empezaron a desarrollar las primeras tecnologías CAD. (14)

Durante este periodo, al igual que pasó con el desarrollo de los motores, tuvieron un gran desarrollo estas tecnologías, hasta que en 1955 el profesor E. Lincoln del Laboratorio del Instituto de Tecnología de Massachusetts logra obtener el primer sistema gráfico que procesaba las localizaciones de varios objetos y los mostraba en una pantalla mediante un tubo de rallos catódicos. (15) y (16)

Semi Automatic Ground Environment (SAGE)



FIGURA 4.3: imagen del SAGE primer sistema grafico que localizaba objetos vía radar y los mostraba en una pantalla. (15)

Posiblemente, el hecho más significativo de la historia del software CAD sea la creación de ‘Sketchpad’, el primer sistema gráfico CAD que funcionaba como un blog de dibujo que plasmaba lo que se iba dibujando sobre una pantalla directamente al ordenador. Fue Iván Sutherland el autor de este avance, aunque, debido al alto precio de los ordenadores en esa época solo algunas compañías de aviación y automovilismo lo usaban. (17)

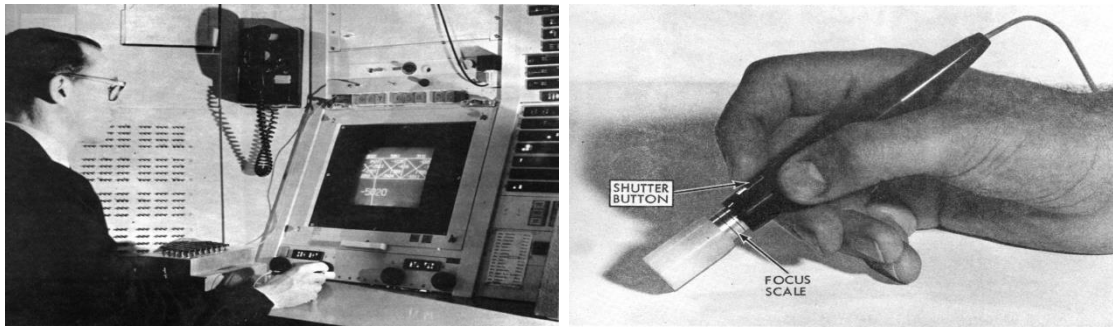


FIGURA 4.4: A la izquierda el primer 'Sketchpad' diseñado por E.Lincoln. A la derecha: El 'lápiz' que se usaba, con sus partes, para que se plasmar los dibujos del 'Sketchpad' al ordenador. (41)

Posterior a esta creación de los años 60, se fue desarrollando toda una tecnología que iba a ser innovadora y muy productiva, destacando sobre los años 70 empresas del automóvil muy conocidas como General Motors, Mercedes-Benz o Toyota. Además de destacar como una de las empresas que investigaban en esta tecnología, 'Dassault Systèmes', la empresa de aviación francesa, creó del programa de diseño CATIA en los años 90. (18)

Los softwares CAD/CAM como CATIA están en continuo avance y cambio debido a las altas necesidades de los tiempos actuales. El trabajo en tres dimensiones cada vez es más habitual y los desarrolladores están invirtiendo más su tiempo y dinero en tener una fiabilidad y prestaciones que potencien estos softwares tan útiles. (19)

4.3. Softwares CAD en el mercado

Los programas de ordenador más utilizados en la actualidad que se ofertan en la web son los siguientes (20):

- **AUTOCAD:** uno de los primeros programas lanzados, concretamente, el formato 2D en 1982 y el formato 3D en 1983. Es el más utilizado en todos los sectores que requieran de planos de gran calidad.



FIGURA 4.5: Imagen del logo de Autocad (42).

- **SolidEdge:** software muy completo que abarca tecnología CAD, CAM y CAE. Creado en 1996 por Intergraph y adquirida por la famosa empresa Siemens. Su mayor uso es el de diseño de electrodomésticos.



FIGURA 4.6: Imagen de logo de SolidEdge (45).

- Catia y SolidWorks: otros programas muy completos que engloban tanto el diseño, análisis, validación, cálculo o la fabricación de piezas o cualquier superficie que podamos darle forma. Todo esto englobado en una única interfaz que agiliza y hace más sencillo todo el proceso. Creados por Dassault Systèmes, empresa aeronáutica, a día de hoy CATIA lo utilizan muchas empresas del sector automovilístico como Seat o del sector ferroviario como CAF.

SolidWorks sin embargo lo utilizan menos empresas, aunque posee una muy buena simulación dinámica de piezas y su propio sistema CAE que hace más precisos todos los cálculos.



FIGURA 4.7: A la izquierda: imagen del logo de Catia (44). A la derecha: imagen del logo de SolidWorks (45)

4.4. Justificación del software utilizado

Se ha visto la gran variedad de software ofertados en el mercado con los que poder realizar nuestro proyecto del motor radial. Sin embargo, la elección es CATIA V5 por la gran facilidad que ofrece el uso de una sola interfaz para el modelado, ensamblaje y renderización del proyecto.

Es por eso CATIA uno de los programas más utilizado a día de hoy entre las empresas más punteras de varios sectores, la funcionalidad y variedad que ofrece todo el paquete de licencias.

4.5. Módulos utilizados en CATIA

Conociendo ya más a fondo el mundo de los softwares CAD y en particular sabiendo que se va a utilizar CATIA, en este proyecto en concreto se utilizarán solo cuatro módulos de todos los que posee el programa.

- *Part Design*: módulo encargado del diseño de todas las piezas.
- *Wireframe and Surface Design*: se centra más en el uso de superficies, se usará para el diseño de tubos.
- *Assembly Design*: ensamblaje de todas las piezas.
- *Drafting*: posibilidad de obtener toda la planimetría del conjunto y sus piezas.

Para reseñar el gran potencial del programa, uno de sus módulos ‘Knowledgeware’ es capaz de relacionar de manera muy sencilla todo lo que se vaya construyendo, consiguiendo así, una de las tareas más importantes y útiles en el mundo CAD, el dibujo

paramétrico. Haciendo posible la recreación de varios modelos de nuestras piezas de distintos tamaños o formas simplemente con cambiar una formula. (21)

5. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL MOTOR

5.1. Refrigeración, combustible y tipo de motor

El motor radial, como se ha comentado anteriormente, se refrigera por aire. Al ser un motor que sigue el ciclo OTTO, usará gasolina 95 octanos y se necesitará una bujía para que la mezcla explote. El motor será uno de cuatro tiempos

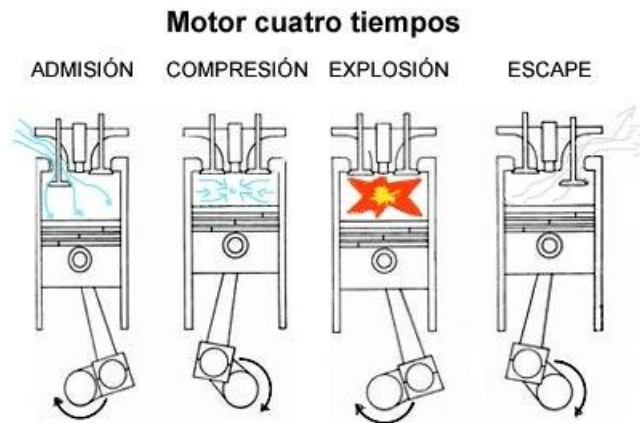


FIGURA 5.1: Imagen del esquema del motor de cuatro tiempos. (22)

5.2. Relación de compresión y geometría del motor

La relación de compresión de un motor se define como el cociente del volumen del cilindro completo entre el volumen de la cámara de combustión. En cuanto a esta relación, siempre se busca que sea lo más grande posible.

Que un motor tenga una relación de compresión alta hace que tenga más potencia ya que al introducir más mezcla en la cámara de combustión la explosión de la misma ejerce más fuerza sobre el pistón lo que genera un aumento de revoluciones del cigüeñal. Para este proyecto se elige una relación de compresión de 9:1 tras observar varios ejemplos de (23).

En cuanto a la geometría del motor, el radio total del bloque del motor, contando con las palancas de la culata es de 169,96 mm. Esta medida se obtiene gracias a una herramienta de medición que integra el programa para medir cualquier tipo de geometría desde superficies hasta distancia entre puntos.

Toda la documentación teórica de motores y máquinas térmicas se ha sacado de (23) y del libro de apuntes de la asignatura cursada en el cuarto curso llamada 'Máquinas Térmicas'.

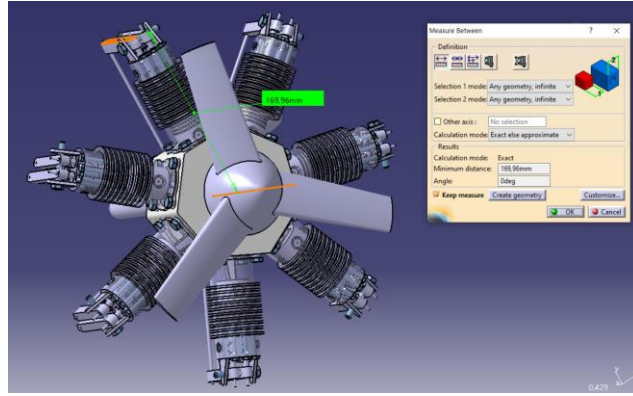


FIGURA 5.2: Imagen de la medición del radio del bloque motor completo.

Para aportar algunos datos geométricos del cilindro, primero, se deben explicar algunos conceptos como la carrera del pistón o la cilindrada. La carrera es la distancia que hay entre el punto muerto superior y el punto muerto inferior del pistón. Es una medida que depende de la relación de longitud que guarden bielas y manivelas. La carrera de los siete pistones que tiene el motor será de 63,4 mm.

La cilindrada es un término bastante sonado en el mundo del motor, pero poca gente sabe realmente lo que es. La cilindrada es el volumen total del interior de cada uno de los cilindros del motor.

$$V_u = \pi \cdot \left(\frac{D^2}{4}\right) \cdot C = \pi \cdot \left(\frac{30^2 \text{mm}^2}{4}\right) \cdot 63,4 \text{mm} = 44,81 \text{cm}^3 \quad (1)$$

Donde:

- V_u : cilindrada unitaria (en mm^3).
- D : Diámetro interior cilindro (mm).
- C : carrera (en mm).

Para calcular el volumen total, simplemente se multiplica por el número de cilindros que tiene el motor:

$$V_t = V_u \cdot N = 44,81 \text{cm}^3 \cdot 7 = 313,67 \text{cm}^3 \quad (2)$$

5.3. Potencia

En su significado más teórico, la potencia es el área bajo la curva del ciclo P-V, gracias a la siguiente expresión conseguimos obtener la potencia indicada de una manera más directa:

$$N_i = V_t \cdot pmi \cdot n \cdot n'$$

$$313,67 \cdot 10^{-6} m^3 \cdot 6 \cdot 10^5 Pa \cdot 3000 rpm \cdot 0,5 = 267,2 kW \quad (3)$$

Donde:

- n : revoluciones por minuto del motor, se elige 3000 rpm.
- Pmi puede tener un valor desde $pmi = 3 \cdot 10^5 Pa$ hasta alcanzar $pmi = 18 \cdot 10^5 Pa$. Se ha tomado la decisión de elegir $pmi = 5 \cdot 10^5 Pa$.
- n' : número de ciclos que se realizan por cada vuelta completa de cigüeñal, como es un motor de cuatro tiempos el valor es de 0,5.

6. MODELADO DE LAS PIEZAS EN CATIA V5

En este apartado se explicará detalladamente los procesos seguidos para construir pieza a pieza el motor radial. Se hablará brevemente de todo el conjunto del motor y la utilidad de cada pieza indicando cómo se ha realizado cada operación y los problemas que han surgido durante el modelado.

Las piezas que no aparecen en (1), se han modelado desde cero, algo que también se plasmará en este apartado, junto a las distintas decisiones tomadas durante el proceso. Para el modelado de las piezas que no aparecían en los planos de la web, se han utilizado los libros (23) y (24) ya que aporta bastantes recomendaciones de diseño de las piezas del proyecto.

6.1. Cilindro

El cilindro es una de las partes más importantes del cilindro, sirve de alojamiento al pistón y en su interior ocurre el ciclo termodinámico, por lo tanto, debe resistir presiones y temperaturas muy altas. El material más utilizado para los cilindros es el acero de alta aleación con estructura austenítica (25).

En este proyecto, el cilindro llevará integradas unas aletas de refrigeración para favorecer el paso de aire y mantener la temperatura de funcionamiento correcta. La refrigeración más usada es mediante liquido refrigerante que envuelve las partes que la necesiten.



FIGURA 6.1: Imagen de ejemplo del cilindro de un motor (26)



FIGURA 6.2: Imagen de un cilindro con aletas de refrigeración. Imagen extraída de la página web de un distribuidor de piezas metálicas de Brasil (11)

Se obvia el número de aletas ni su geometría específica ya que esas decisiones deberían ser tomadas en función de cálculos de transmisión de calor.

6.1.1. Modificaciones respecto a los planos iniciales

Los planos encontrados en (1) serían posiblemente para alguna maqueta sin funcionalidad y por lo tanto el cilindro no tenía ningún volumen reservado para la cámara de combustión. De manera muy sencilla se podría ampliar la altura del cilindro, pero se debe hacer en función de la relación de combustión escogida.

Gracias a la Ecuación 1, se conoce el volumen de un cilindro y por lo tanto la expresión que define la relación de compresión queda de la siguiente manera:

$$\epsilon = \frac{V_{cc} + V_u}{V_{cc}} = \frac{V_{cc} + 44,81 \text{ cm}^3}{V_{cc}} = 9 ; V_{cc} = 5,60 \text{ cm}^3 \quad (4)$$

Finalmente, para obtener la altura de la cámara de combustión se usa la expresión que define su volumen:

$$V_u = \pi \cdot \left(\frac{D^2}{4}\right) \cdot h = \pi \cdot \left(\frac{30^2 \text{ mm}^2}{4}\right) \cdot h \text{ mm} = 44814 \text{ mm}^3 ; h = 7,925 \text{ mm} \quad (5)$$

Por lo tanto, la altura del cilindro debe aumentar 7,5 mm y pasa de medir 63,4 mm a 71,325 mm.

6.1.2. Modelado del cilindro

Para el modelado del cilindro se ha utilizado la herramienta 'Shaft' que permite generar volúmenes de revolución en torno a un eje. En este caso en torno al eje z.

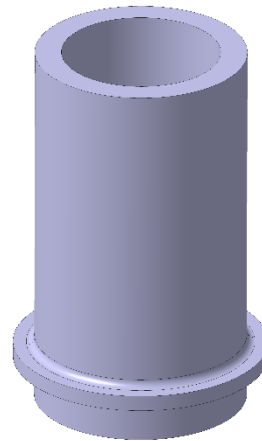
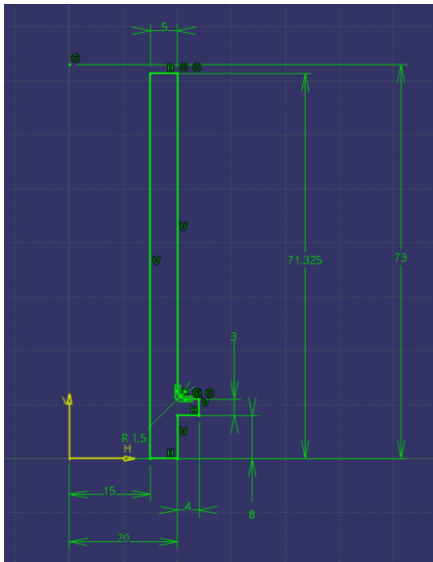


FIGURA 6.4: A la izquierda: 'sketch' del volumen de revolución. A la derecha: volumen de revolución resultante

Esa solapa que se modela en la parte inferior es la que irá apoyada en el cuerpo del motor e irá fijada con tornillería.

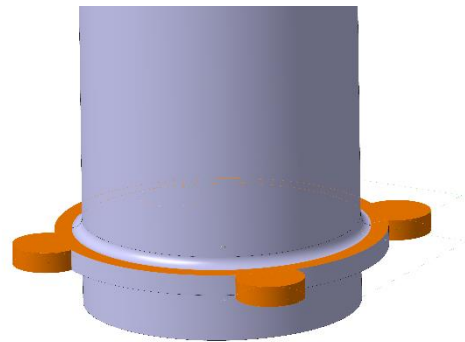
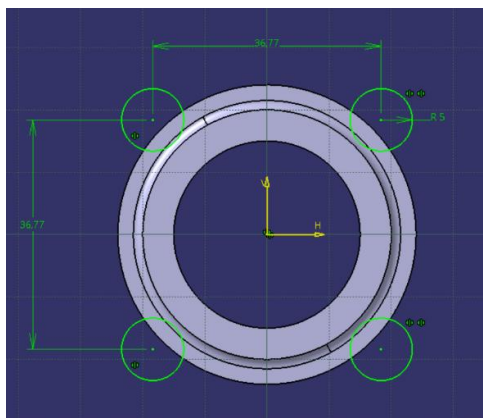


FIGURA 6.3: A la izquierda: el sketch utilizado para la realización de la solapa. A la derecha el modelo 3D de la operación realizada

Como se observa en la Figura 17, a la derecha aparece la operación realizada en color naranja, la superficie superior de la solapa aparece marcada porque la herramienta utilizada, herramienta 'Pad' que es una extrusión, marca la opción de realizar la operación hasta un plano que marque el usuario, en este caso, se marca la cara superior de la solapa.

El radio de acuerdo entre este 'Pad' y el resto de la solapa es de 5 mm y se modela usando la herramienta 'EdgeFillet' que redondea las aristas vivas con el radio que se le indique.

Esta solapa llevará unos taladros roscados concéntricos con las circunferencias de la última operación realizada, se realizan con la operación 'Hole' y marcamos la opción de roscado. El taladro tiene una métrica M6.

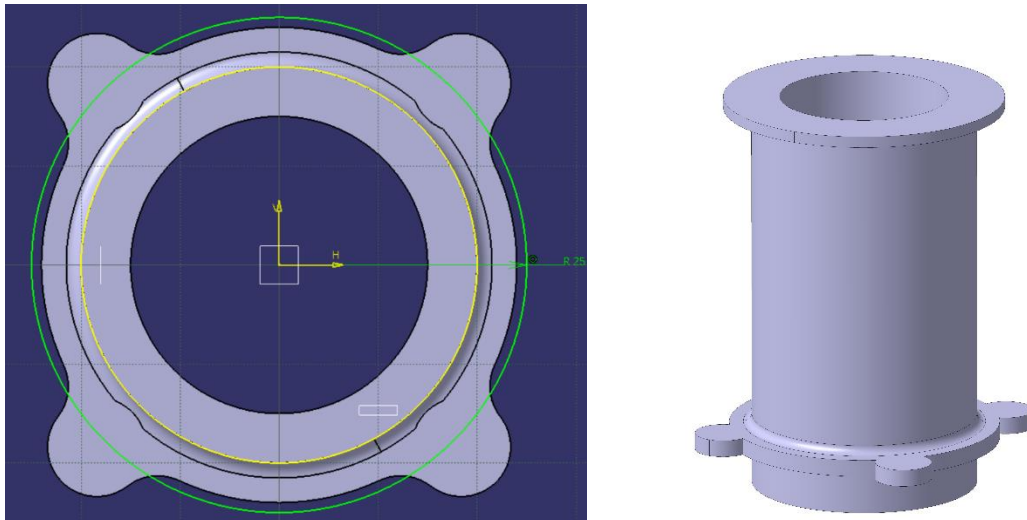


FIGURA 6.5: A la izquierda: sketch utilizado para realizar, de nuevo, la operación 'Pad'. A la derecha: modelo 3D con la aleta en la parte superior del cilindro.

La siguiente operación es la de construir las aletas de refrigeración que se muestra en la *Figura 19*. Tras modelar la primera aleta, el resto de aletas se modelan de manera automática usando la herramienta de patrón.

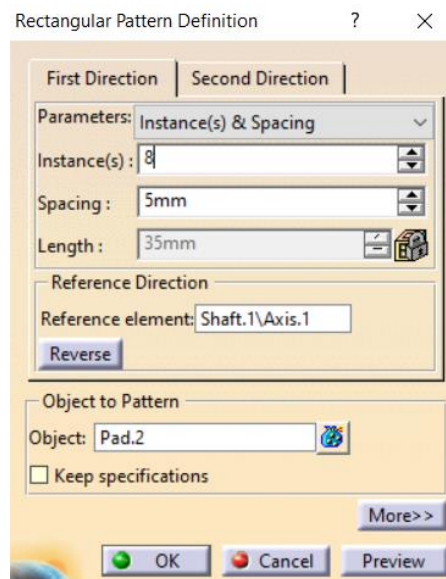


FIGURA 6.6: ventana de configuración del patrón, como se observa, el patrón se repite 8 veces y con una distancia entre planos superiores de la aleta de 5 mm.

Seguidamente, se taladra la parte superior del cilindro para modelar los agujeros donde irán alojados los tornillos que unen la culata y el mismo cilindro. De nuevo se usa la operación 'Hole' y se señala el punto y la superficie donde se generará el taladro.

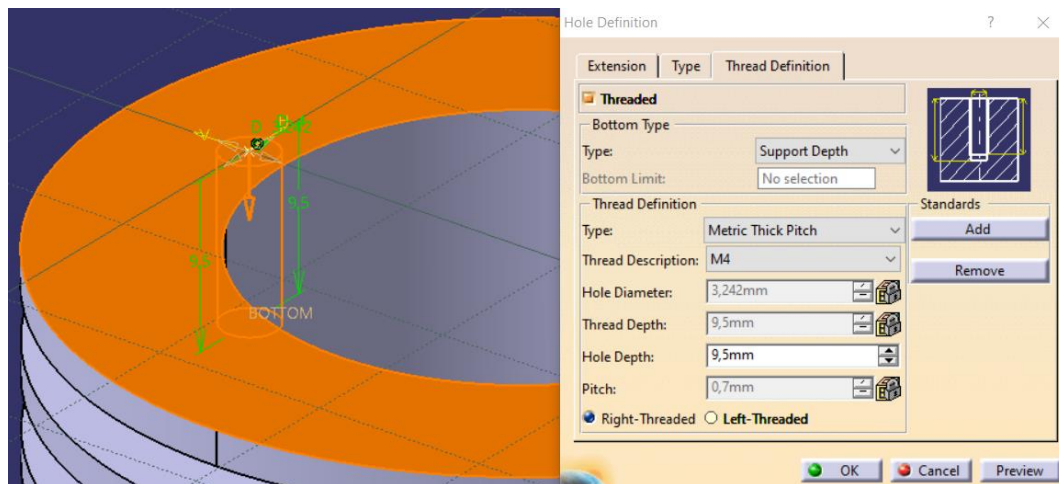


FIGURA 6.7: imagen del taladro y la ventana donde se configura el roscado del taladro, en este caso M4.

Para generar el resto de taladros se utiliza un patrón circular, para los agujeros del otro lado del cilindro se ha utilizado la herramienta 'Mirror' que replica las operaciones que se marquen con respecto a un plano. El resultado final es el siguiente:

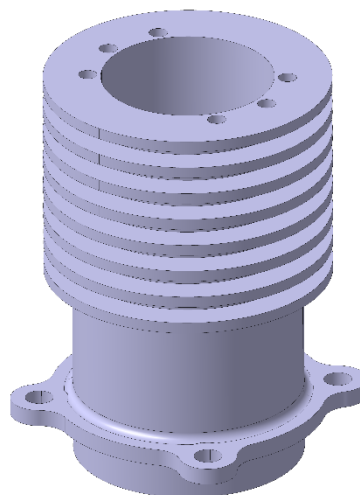


FIGURA 6.8: imagen del resultado final del cilindro.

6.2. Culata

La culata de un motor se sitúa justo encima del cilindro, es una de las piezas más complejas en cuanto a diseño y materiales ya que debe soportar altas presiones de los gases de admisión y escape, vibraciones producidas por el movimiento del árbol de levas y de las válvulas y altas temperaturas (23). Una de las piezas en las que más cálculos estructurales y de simulación de flujos se tendrían que hacer. Los materiales que se están utilizando en la actualidad son las aleaciones de aluminio con silicio, magnesio o cobre que le añaden conductividad térmica y ligereza. (27)



FIGURA 6.9: imagen del corte de una culata con doble árbol de transmisión. La finalidad de esta foto es para que se observe el interior de una culata, los conductos de admisión y escape, las válvulas y el alojamiento de la posible bujía. (28)

Se comienza hablando de los conductos de escape y de admisión. Deben ser cavidades amplias para lograr un rendimiento volumétrico lo más alto posible, se siguen las recomendaciones de diseño de (23) para estas cavidades siendo estas las siguientes.

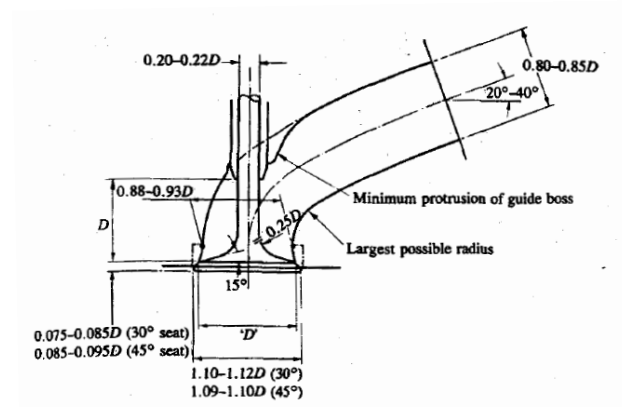


FIGURA 6.10: cavidad y válvula de admisión, junto a las recomendaciones de diseño para maximizar su rendimiento. (24)

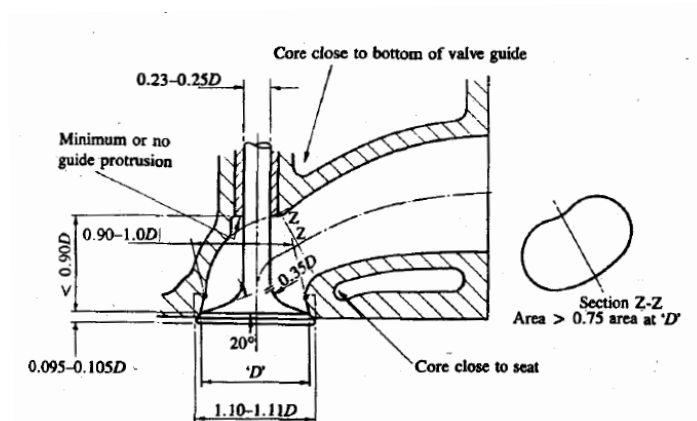


FIGURA 6.11: cavidad y válvula de escape, junto a las recomendaciones de diseño para minimizar el contacto de la espiga con los gases de escape, favoreciendo su refrigeración. (24)

Como se puede observar en las *Figuras 25 y 26* las válvulas realizan el asiento sobre un chaflán realizado a la entrada de las cavidades. La guía de las válvulas debe ser la encargada de mantener centrada la válvula y de su refrigeración, prestando especial atención sobre la válvula de escape como se ha comentado anteriormente. (24)

En cuanto al alojamiento de la bujía, se ha realizado una búsqueda de catálogos para realizar el agujero del alojamiento de la bujía en función de un producto real. Se ha optado por utilizar la bujía '*OS Number 8 Glow Plug*' de la marca OS (29). Esta decisión es puramente geométrica ya que en la página web especifica que la bujía se utiliza mayormente en motores de dos tiempos y este es de cuatro, pero, para que encajase en el modelo la mejor opción era esta.



FIGURA 6.12: imagen de la bujía que se alojaría en la culata. Tiene una métrica 1/4-32. (29)

6.1.3. Cálculos de la culata

Parámetros de la cavidad de admisión

Primeramente, se ha elegido el diámetro de la salida del conducto y donde se asentará la válvula de admisión. Este valor debe ser elegido por el diseñador de la culata y en este caso, y teniendo en cuenta el reducido espacio, se he elegido un diámetro de 9 mm. Una vez se conoce el diámetro de la salida se puede continuar construyendo esta cavidad, ya que el resto de valores están en función de este diámetro.

Volviendo a usar la *Figura 24*, se toman las siguientes decisiones:

- La pendiente del tramo recto, el autor sugiere que esté entre 20° y 40°, se elige el valor de 40°.
- El diámetro de entrada al conducto debe estar entre 0,8 D y 0,85 D , es decir, entre 7,2 y 7,65 mm. En este caso se elige el valor de 7,65 mm.
- El chaflán del orificio de salida se ha decidido hacer de 0,4 x 45°.
- El diámetro de la guía debe ser de 3 mm. El extremo de la guía dentro de la cavidad debe estar a 9 mm del orificio de salida de los gases al cilindro.

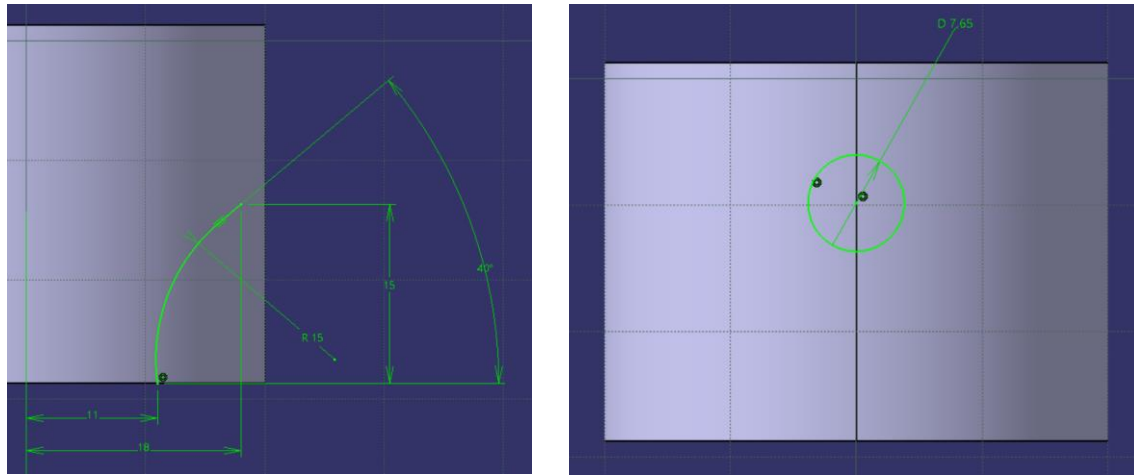


FIGURA 6.13: A la izquierda: 'sketch' de algunos parámetros comentados anteriormente para la construcción de la cavidad de admisión. A la derecha: diámetro de entrada de los gases a la cavidad.

Parámetros de la cavidad de salida

Al igual que en la cavidad de entrada, el diámetro de entrada de los gases desde el cilindro es de 9 mm.

- El diámetro de salida de los gases se escoge mediante una sencilla comparación entre las áreas de salida y entrada de los gases que propone el autor de [35].

$$A_e = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot D_e^2 = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot 9^2 = 63,62 \text{ mm}^2$$

$$A_s = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot D_s^2 = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot 8,5^2 = 53,75 \text{ mm}^2 \quad (6)$$

$$\frac{A_s}{A_e} \cdot 100 = 89,20\% > 75\%$$

Donde A_e es el área de entrada de gases y A_s es el área de salida de gases. Por lo tanto, el diámetro escogido para el orificio de salida de los gases es de 8,5 mm.

- El chaflán del asiento de la válvula debe hacerse con una medida de 0,4 x 45°.
- La guía de la válvula se ha modelado con un diámetro de 3,25 mm.

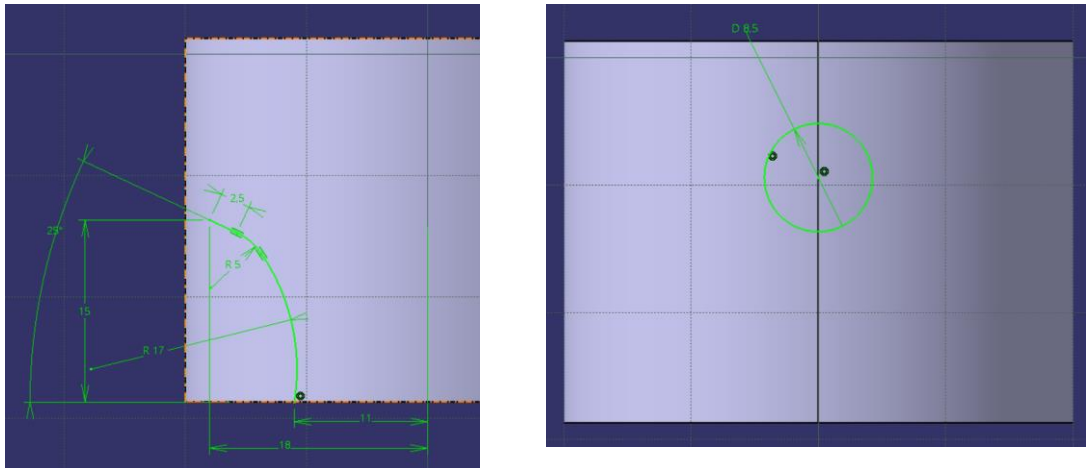


FIGURA 6.14 A la izquierda el 'sketch' auxiliar para la construcción de la cavidad de salida. A la derecha: diámetro de salida de los gases de escape.

6.1.4. Modelado de la culata

El modelado de la culata comienza con una sencilla operación de extrusión de 30 mm a partir de un 'sketch' de una circunferencia de 20 mm de radio.

Gracias a la Figura 27 se conocen los parámetros necesarios para la construcción de esa cavidad de entrada. Para esta operación se usa una herramienta avanzada como es 'Removed Multi-Sections Solid' que mediante un dibujo inicial y otro dibujo que sirva de guía elimina material generando la forma deseada por el usuario.

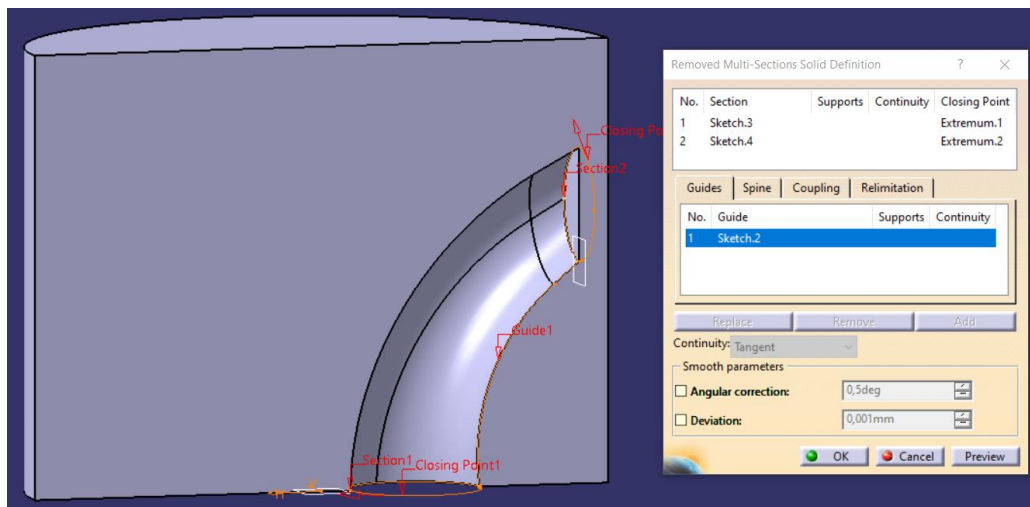


FIGURA 6.15: imagen de la herramienta 'Removed Multi-Sections Solid' y del resultado de la operación.

El sobrante de material que queda para hacer el orificio de entrada de los gases se realiza con un 'pocket', usando el mismo 'sketch' de su circunferencia utilizado en la operación anterior.

La cavidad de escape se realiza exactamente igual, pero con los dibujos de la Figura 28. Seguidamente, una vez modelados los conductos de admisión y escape de los gases, se realizan los taladros donde irán los tornillos que unen el cilindro con la culata, estos tornillos deben atravesar toda la culata para llegar al cilindro.

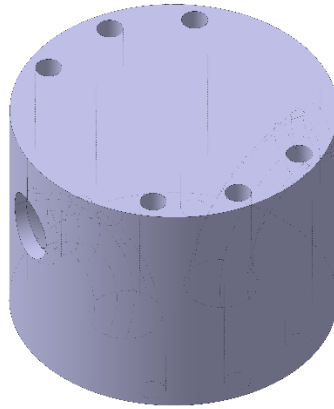


FIGURA 6.16: imagen de la culata con los taladros para unir cilindro y culata, junto con las cavidades de salida y entrada de gases.

Las guías de las válvulas tendrán las medidas y las especificaciones ya comentadas en el apartado 6.1.3. El resultado mostrado mediante un corte transversal es el siguiente.

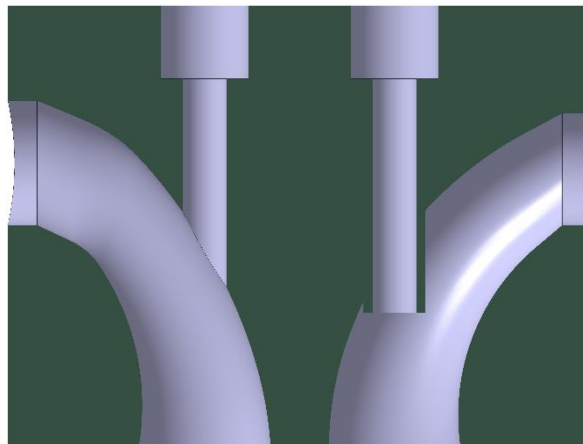


FIGURA 6.17: corte transversal de la culata donde aparecen los conductos de escape y admisión y los alojamientos de las válvulas (derecha admisión e izquierda escape)

El siguiente paso son las aletas de refrigeración para continuar con el patrón del cilindro, se hacen dos más y la última aleta tiene de separación con los orificios de 5 mm. Finalmente, se modela el alojamiento escalonado de la bujía y los taladros para sujetar el soporte de la palanca a la culata y ya tendríamos la culata acabada. Destacar la gran complejidad de conductos en el interior de la culata y la gran toma de decisiones que se ha llevado a cabo en la conformación de esta pieza.

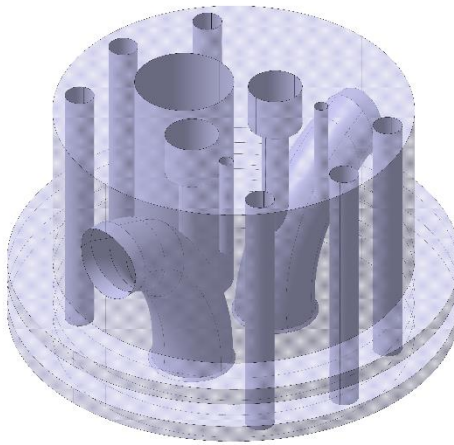


FIGURA 6.18: imagen de la culata y todas las cavidades que se han modelado en su interior

6.3. Cuerpo

El cuerpo del motor es el elemento que debe aportar más rigidez ya que es donde se alojan los cilindros y por donde pasa el cigüeñal desde las bielas hasta las hélices. Los materiales más utilizados para fabricar el cuerpo del motor son los hierros fundidos (30). Como se comentó anteriormente, al ser un motor radial, el cuerpo quedará fijo en todo momento y será el cigüeñal el que gire con respecto a su eje central. (23)

Cabe la posibilidad de que en un motor radial existan varios cuerpos de motor o uno solo más grande que albergue más cilindros que el motor del proyecto, siempre buscando la mayor rentabilidad y rendimiento.

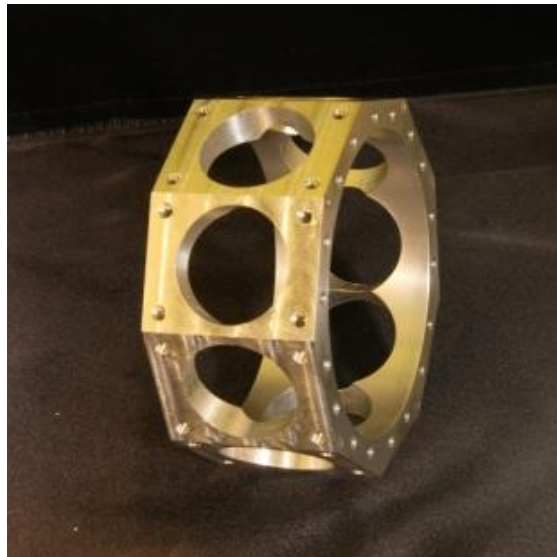


FIGURA 6.19: imagen del cuerpo de un motor radial de 7 cilindros. (31)

6.4.5. Modificaciones respecto a los planos iniciales

La única modificación que se realiza con respecto a los planos iniciales son los taladros en cada cara donde van alojados los cilindros para asegurar la fijación de los mismos al cuerpo.

6.4.6. Modelado del cuerpo

Para empezar el cuerpo, se realiza un dibujo del hexágono con las medidas precisas y se realiza la extrusión del bloque completo, es decir, 74 mm.

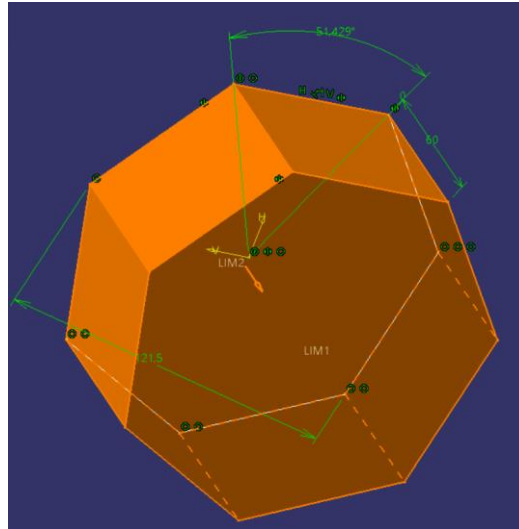


FIGURA 6.20: imagen de la extrusión del bloque completo.

Posteriormente, se realiza el vaciado del bloque haciendo un 'Pocket' de una circunferencia de radio 50 mm y una profundidad de 55 mm. Además, se modela un pequeño cilindro concéntrico en el fondo que se genera de radio 17,5 mm y profundidad de 8 mm. La arista viva que se genera entre el cuerpo y el nuevo cilindro se redondea con un radio de 5mm.

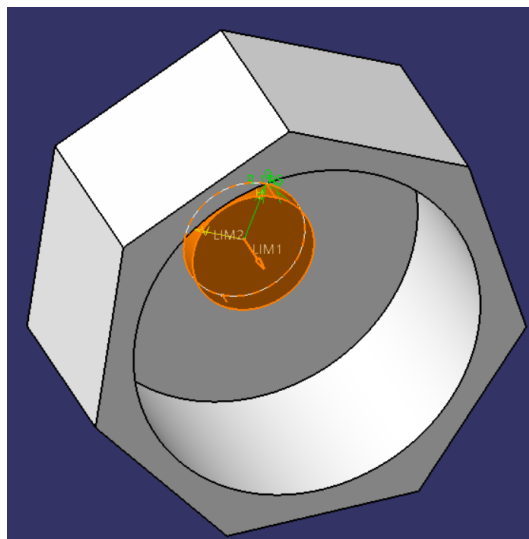


FIGURA 6.21: imagen del vaciado y la extrusión del cilindro por donde pasará el cigüeñal.

Como se ha comentado anteriormente, el siguiente paso es realizar el vaciado de dicho cilindro para que pase el cigüeñal de radio 12,5 mm. Los alojamientos de los cilindros se realizan en las siete caras laterales, taladros pasantes sin rosca. Para realizar el resto de alojamientos se utiliza la herramienta de patrón.

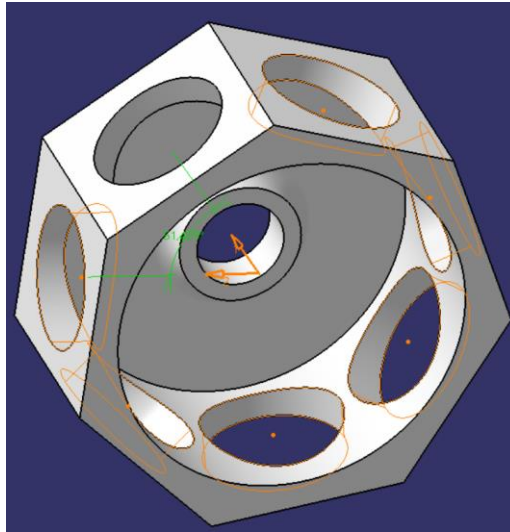


FIGURA 6.22: imagen de los alojamientos de los cilindros y del paso del cigüeñal redondeado.

Finalmente, se realizan los taladros roscados donde irá la tornillería que fija cuerpo-cilindro y se redondean las aristas vivas que resultan entre superficies laterales.

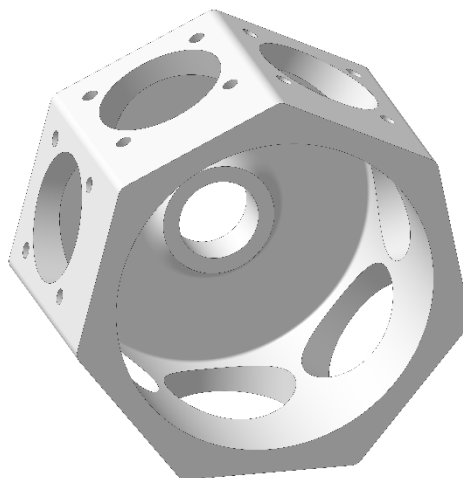


FIGURA 6.23: resultado final del cuerpo.

6.4. Pistón

El pistón es una pieza fundamental para el correcto funcionamiento del ciclo termodinámico. El pistón debe transmitir a la biela el movimiento generado en el ciclo sin que ocurra ninguna fuga de mezcla o aceite. Mayormente, se fabrica con aleaciones tipo aluminio-cobre, aluminio-cobre-níquel-hierro y aluminio-silicio. (32)

Esta pieza tiene varias partes que son de vital importancia y se debe explicar su funcionamiento. En primer lugar, y siguiendo un orden descendente desde la cabeza hasta la falda del pistón, la cabeza del pistón, que en la mayoría de los casos están fabricadas

con ciertos surcos y hendiduras para mejorar la distribución de la mezcla y subir el rendimiento del ciclo, en este caso en el proyecto no se ha contemplado esta posibilidad y por lo tanto es una cabeza plana. (23)

Seguidamente se encuentran los portasegmentos, que son esas ranuras donde van alojados los segmentos y se dividen en varios tipos. El primer y segundo segmento son los encargados de dejar estanca la cámara de combustión, separando la cámara de combustión del alojamiento de las bielas y el cigüeñal. El último segmento es el encargado de dejar estanca esta cavidad donde deben estar lubricados constantemente tanto bielas como cigüeñal con aceite.

Por último, la falda del pistón que es lo que termina de definir la forma del pistón alberga una cavidad y un orificio donde se aloja el bulón, pieza cilíndrica que sirve de unión entre la biela y el pistón. (24)

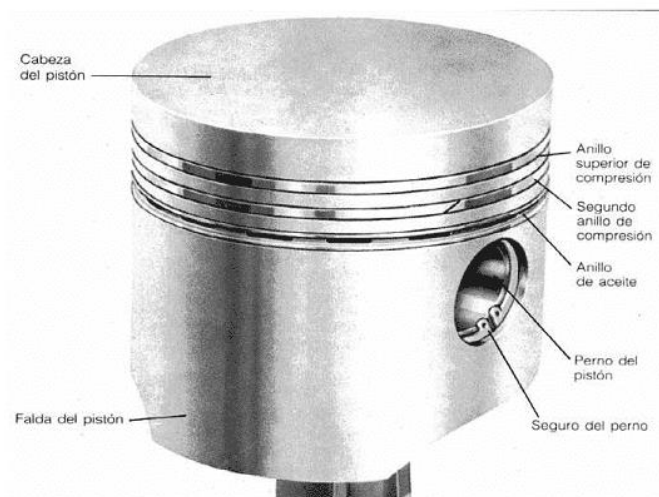


FIGURA 6.24: imagen del pistón donde se pueden ver todas sus partes. (33)

6.4.1. Parámetros del pistón

Una vez que se conocen las partes que conforman el pistón, se utiliza la tabla 27.5 de (23) para modelar la pieza con dimensiones proporcionales.

Dimensiones	Rango típico
Altura total	(0,6-1,5) D
Distancia entre el eje del bulón y la cabeza	(0,3-0,6) D
Longitud de la falda	(0,4-0,7) D
Diámetro exterior del bulón	(0,2-0,4) D
Altura de segmento de estanqueidad	(0,02-0,025) D
Altura de segmento rascador	(0,04-0,045) D

Tabla 1: Parámetros del modelado del pistón en función del diámetro exterior del mismo.

- La altura total del pistón debe estar entre 18 mm y 45 mm, según la tabla de referencia. En este caso se decide modelar una altura total de 30 mm.
- La distancia entre el eje del bulón y la cabeza debe estar entre 9 mm y 18 mm y se decide que esa distancia será de 18 mm.

- La longitud de la falda tendría que estar entre 12 mm y 21 mm y tiene 19,5 mm.
- El diámetro del bulón se modela en 10,05 mm contando con cierta holgura.
- El segmento de estanqueidad tendrá entre 0,6 y 0,75 mm y se construye con una altura de 0,75 mm.
- Para el segmento rascador, el valor de la altura debe encontrarse entre 1,2 y 1,35 mm y se decide que la altura sea de 1,35 mm.

6.4.2. Modelado del pistón

Primeramente, se utiliza la herramienta de 'Sketch' donde se dibuja media sección del pistón incluyendo los portasegmentos.

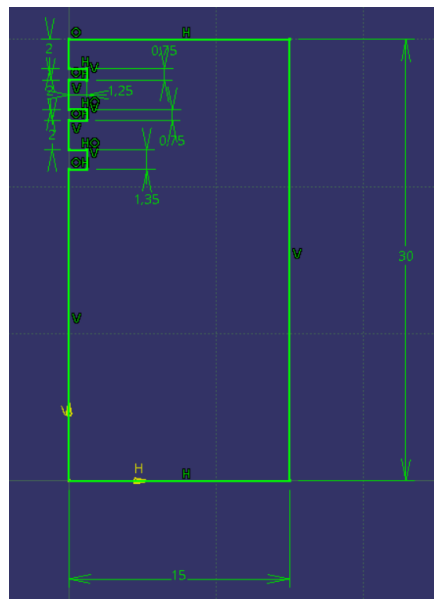


FIGURA 6.25: 'Sketch' usado en la primera operación del modelado.

Tras esta operación se realiza el taladro donde irá alojado el bulón, se utiliza la herramienta 'Pocket' dibujando previamente una circunferencia de 10,05 mm de diámetro y seleccionando la opción 'Up to last' que alarga esta operación hasta la última parte sólida que se encuentre.

Se realiza un chaflán de 45° y 1,25 mm de longitud en los bordes que genera el taladro. Finalmente, la ranura inferior donde irá alojada la biela y fijado con el bulón, el resultado es el siguiente:

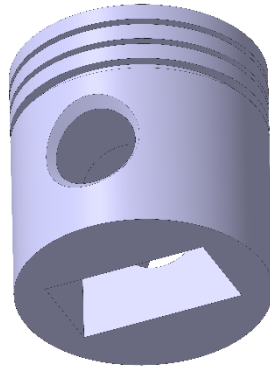


FIGURA 6.26: imagen del modelado final del pistón.

6.5. Bulón

El bulón es el elemento necesario para transmitir las fuerzas desde el pistón hasta la biela.

6.5.1. Parámetros del bulón

Una vez más, siguiendo las recomendaciones de [31] y más en concreto de su Tabla 27.6

Tipo de motor	Diámetro (d)	Espesor (e)
MEP	(0,2-0-26) D	(0,03-0,045) D

Tabla 2: Dimensiones relativas del bulón.

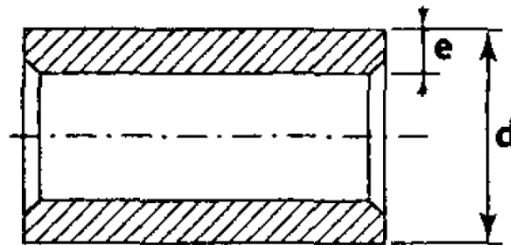


FIGURA 6.27: esquema de las dimensiones básicas del bulón. (23)

- El diámetro elegido es de 8 mm.
- El espesor final es de 3 mm.

6.5.2. Modelado del bulón

El bulón tiene un modelado muy simple con una sola operación de extrusión de un dibujo con dos circunferencias concéntricas siguiendo las medidas indicadas en el apartado 6.5.1.



FIGURA 6.28: resultado final del bulón.

6.6. Segmentos

En el apartado 6.4 se ha hablado de los segmentos y su tipología. Segmentos de estanqueidad para que se encargan de mantener aislada la cámara de combustión y comprimir las paredes del cilindro y segmentos rascadores que arrastran el aceite cercano al resto de segmentos y lo devuelve al lugar donde debe estar.

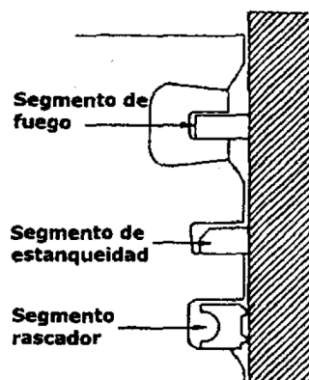


FIGURA 6.29: esquema resumen de los tipos de segmentos usados. El segmento de fuego es un segmento de estanqueidad con propiedades térmicas aún más especiales que el resto de segmentos de estanqueidad. (23)

6.6.1. Modelado de los segmentos

Se caracteriza por tener una sola operación de extrusión con un dibujo con dos circunferencias concéntricas. Se suelen utilizar materiales como el níquel, silicio y magnesio. (34)

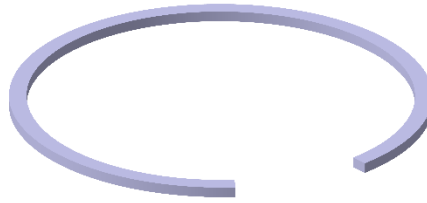


FIGURA 6.30: imagen del segmento de estanqueidad, la diferencia con el rascador es la profundidad de la extrusión.

6.7. Biela madre

La biela madre es la pieza a la que van conectadas todas las bielas y a su vez va conectada a un pistón. Debe tener una geometría especial capaz de resistir todos los movimientos rotatorios del pistón y del resto de bielas, esto se consigue usando aleaciones de acero y titanio o aluminio (35). Tiene un orificio donde pasa el cigüeñal, al cual, le transmite el movimiento rotatorio.

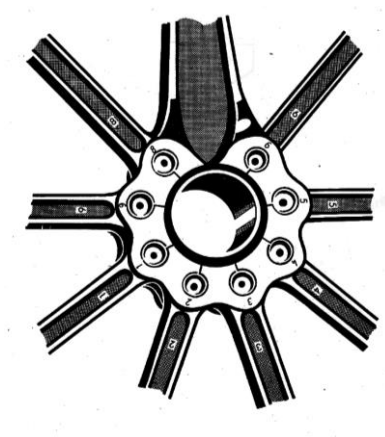


FIGURA 6.31: representación de una biela madre conectada al resto de bielas del motor. (36)

6.7.1. Modelado de la biela madre

Se ha comenzado con el modelado de la cabeza de la biela madre haciendo una simple extrusión de dos circunferencias concéntricas de 10 y 14 mm respectivamente. Seguidamente se realiza el 'sketch' de toda la biela madre:

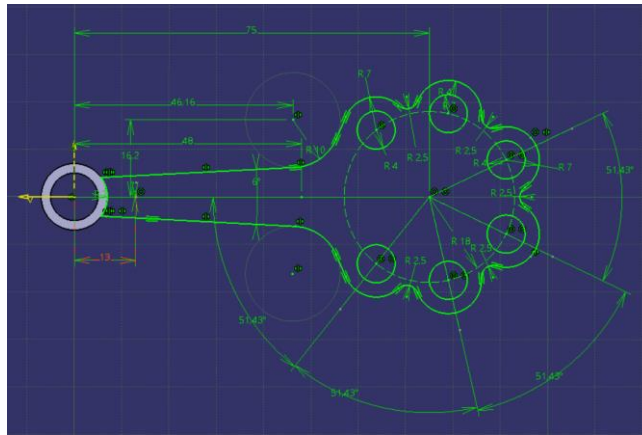


FIGURA 6.32: imagen del ‘sketch’ de la biela madre.

Una vez se extruye el '*sketch*' de la figura 46 se realizan los vaciados de la parte central de la biela madre. Estos vaciados se hacen para generar un perfil en forma de '*I*' ya que estos perfiles son más resistentes que si se usara una sección rectangular maciza.

Esto es debido a su método de fabricación, el laminado en caliente. Este método y la distribución de esfuerzos debido a su geometría los hacen a estos tipos de perfiles, llamados perfiles estructurales, los más resistentes del mercado. (37)

Realizando estos vaciados se intentan emular esos perfiles sumando resistencia a la pieza.

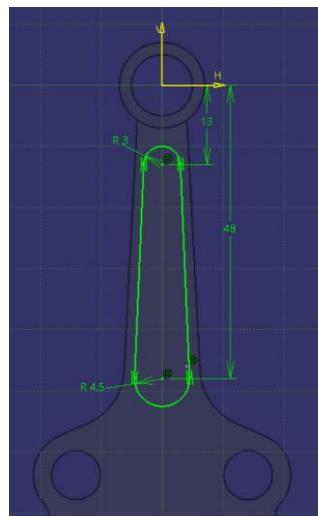


FIGURA 6.33: ‘sketch’ del vaciado de la parte central de la biela.

Para que en la figura 47 apareciese el resto de la pieza con un color más oscuro, se ha utilizado una muy útil herramienta de este software que es la opción '*low light*'. Es una manera en la que se puede ver el '*sketch*' en la parte superior es la visión usual donde se puede hacer '*click*' sobre el resto de la pieza. El icono central es el que se ha comentado anteriormente llamado '*low light*' donde el fondo aparece en oscuro y no se puede hacer ninguna operación sobre el resto de la pieza que no se este trabajando. El icono final oculta por completo el resto de la pieza quedando únicamente el '*sketch*' de trabajo.



FIGURA 6.34: diferentes maneras de ver un 'sketch'

La siguiente operación realizada ha sido la del redondeado de aristas vivas y en especial el de la unión entre el cuerpo de la biela madre y la cabeza, ya que es un cambio de sección muy pronunciado donde se acumulan muchos esfuerzos.

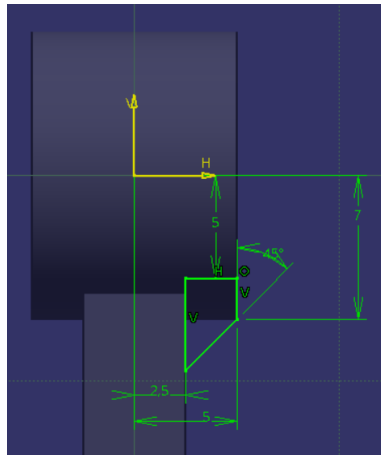


FIGURA 6.35: 'sketch' que se utiliza para disminuir el cambio tan brusco de sección entre cabeza y cuerpo de biela madre.

Tras esta operación se hace un corte por los laterales del cuerpo de la biela madre para acabar con el redondeado de cabeza y cuerpo. Finalmente, tras realizar todos los redondeados se genera una especie de rampa para favorecer a la distribución homogénea de esfuerzos durante el trabajo de la pieza con el cigüeñal y el taladro por donde pasará el cigüeñal y el resultado final es el siguiente:

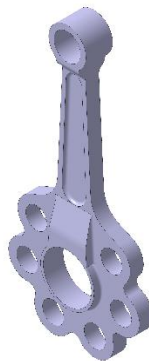


FIGURA 6.36: resultado final de la biela madre con todas sus operaciones.

6.8. Biela

La biela tiene en común con la biela madre sus funciones de transmitir el movimiento que genera de manera lineal el pistón al cigüeñal de manera rotatoria. Tiene un diseño más simple que la biela madre y no tiene ninguna particularidad muy distinta a la misma.

Aloja dos bulones, uno para conectar pistón con biela y otro para conectarse a la biela madre.

6.8.1. Modelado de la biela

La manera de proceder es prácticamente igual a la de la biela madre. Se comienza realizando la extrusión de la cabeza y seguidamente se hace la extrusión del cuerpo de la biela esta vez sin la geometría tan compleja de la biela madre.

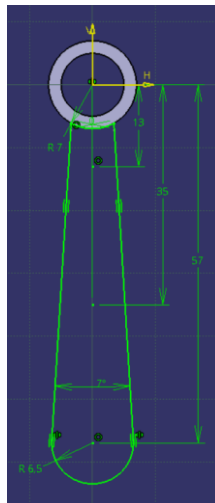


FIGURA 6.37: 'sketch' utilizado para el modelado del cuerpo de la biela.

Tras tener el cuerpo modelado se le da forma con unas extrusiones algunos vaciados para obtener la forma deseada.

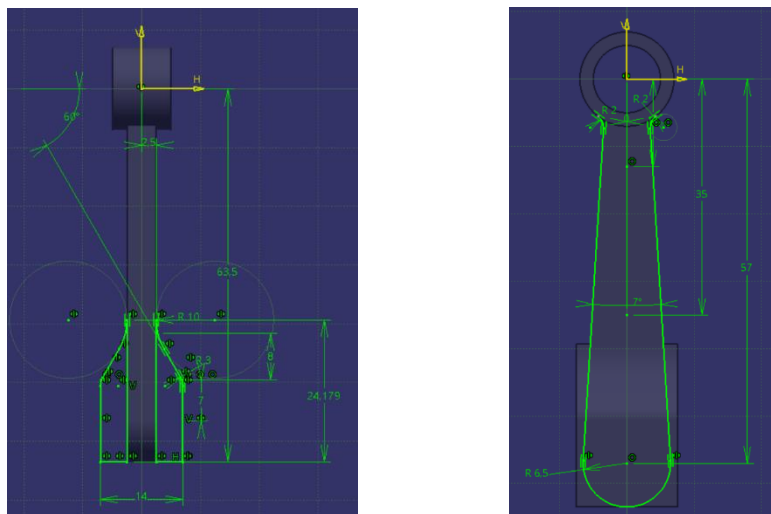


FIGURA 6.38: a la izquierda: 'sketch' de la extrusión de los perfiles que sobresalen en la zona cercana a la conexión con la biela madre. A la derecha: 'sketch' del vaciado modelado para darle la forma final deseada.

El resto de operaciones ya se han explicado detalladamente en el apartado anterior, vaciado del cuerpo interior, taladro del alojamiento del bulón biela madre-biela y redondeos de aristas. El resultado final de la biela es el siguiente:

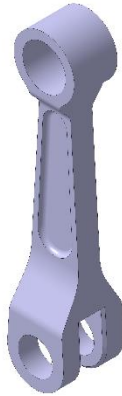


FIGURA 6.39: imagen del resultado del modelado de la biela.

6.9. Cono y aspa

Estas dos piezas se introducen en el mismo apartado porque el método de modelado las une mediante lo que se conoce como operaciones booleanas que se explicará más adelante.

El cono y las aspas son los elementos que más depurada deben tener la aerodinámica ya que son los primeros contactos del aire a su paso. El cono tiene una gran curvatura y una punta redondeada para favorecer el paso de aire hacia las aspas de manera limpia, es donde van alojadas las tres aspas las cuales se mueven gracias al mismo por la potencia transmitida por el cigüeñal.

Las aspas tienen un perfil muy suavizado, es decir, no tiene aristas de ningún tipo. Esto hace que la masa de aire fluya por su perfil sin despegarse en ningún momento de su capa límite. Las aspas deben ser ligeras y para ello se fabrican en aluminio [59]. Las aspas deberían tener el perfil con mayor rendimiento posible, pero, de nuevo, el objetivo del proyecto no es ese y se obvian esos cálculos.

6.9.2. Modelado del cono

El cono del motor es un cuerpo de revolución y se modela como tal, mediante la herramienta 'Shaft'.

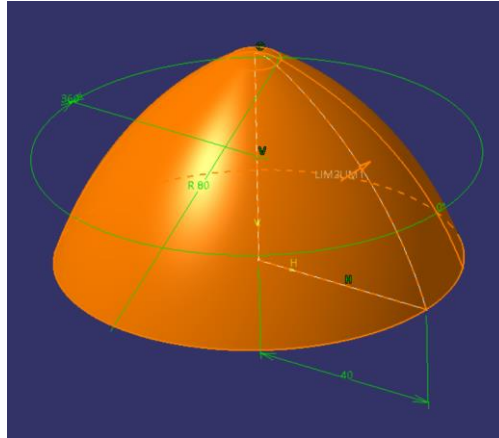


FIGURA 6.40: volumen de revolución junto al 'sketch' utilizado.

Seguidamente, se modelan las extrusiones donde irán alojadas las aspas del motor, siguiendo las medidas indicadas en los planos. Una vez se tienen dos extrusiones se utiliza la operación de patrón para generar las extrusiones alrededor del cuerpo de revolución y poder encajar las tres aspas. Finalmente, se realiza el taladro roscado en la zona inferior del cono donde irá el extremo del cigüeñal.

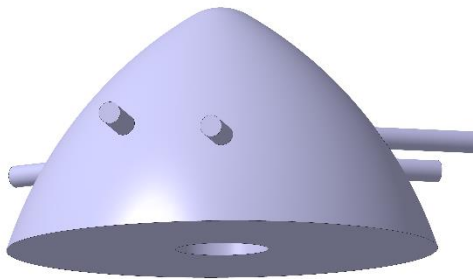


FIGURA 6.41: resultado del modelado del cono del motor.

6.9.3. Modelado del aspa

El modelado del aspa va muy ligado al modelado del cono ya que se partirá del cono para obtener el aspa. Lo primero del modelado, es que se guarda el archivo con un nombre distinto al que tenía el cono para que genera una pieza distinta a partir del cono.

A continuación, se genera es un 'Body' nuevo en el que dibujaremos los dos perfiles, cada uno en un extremo del aspa, aunque el perfil que conecta con el cono se dibuja en el interior del cono para garantizar que los dos cuerpos se conectan, quedando lo siguiente:

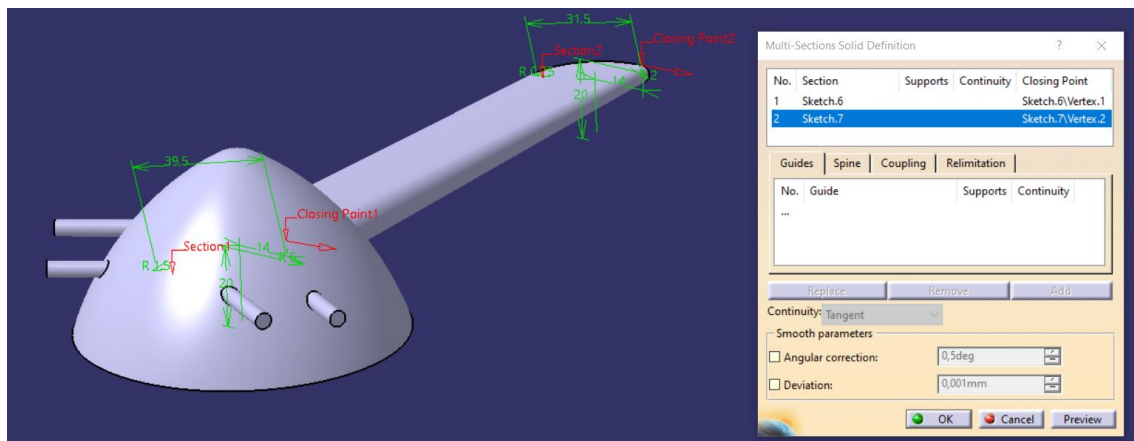


FIGURA 6.42: modelado del aspa a partir del cono, usando la herramienta 'Multi-Sections Solid', cuyos parámetros aparecen a la derecha.

Una vez que se tienen modelados los dos cuerpos diferenciados en el árbol, viene un paso fundamental, hacer el 'Body' que posee el aspa, 'PartBody', es decir, hacer el aspa la pieza principal del archivo. Una vez están bien organizados los cuerpos del archivo usamos las operaciones booleanas para realizar cortes o nuevas piezas a partir de otras distintas generando intersecciones muy complejas de obtener sin estas operaciones.

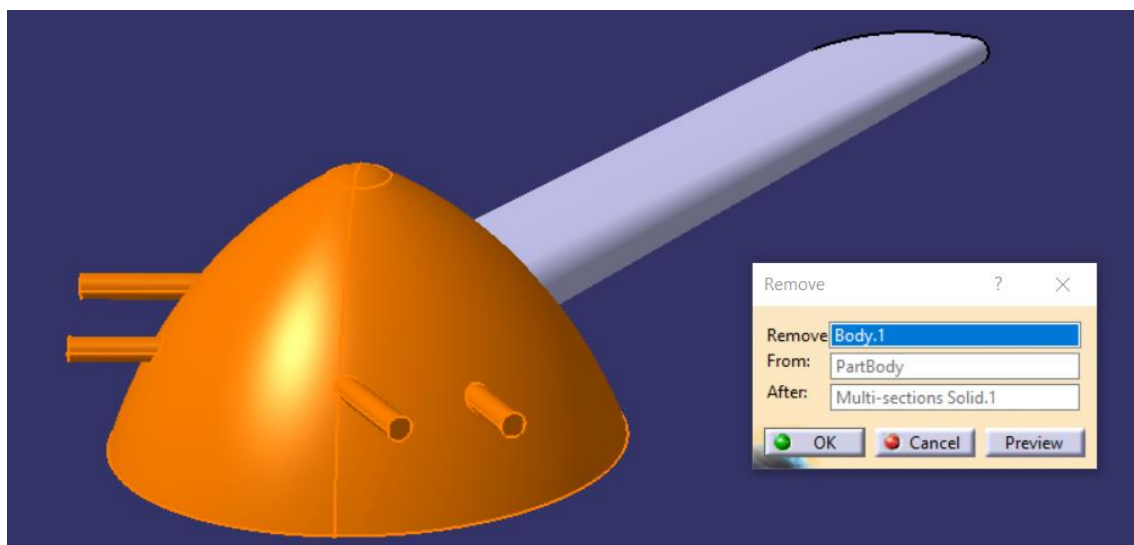


FIGURA 6.43: operación booleana de 'Remove' eliminando el aspa que se encuentra en el interior del cono quedando el perfil deseado con la misma curvatura que la cara de revolución del cono.

Una vez se utiliza la operación booleana de 'Remove', queda solamente el aspa sin el cono. Además, se ha realizado en el perfil más alejado del aspa, un 'Pocket' para hacer más aerodinámico el perfil quedando el resultado final.

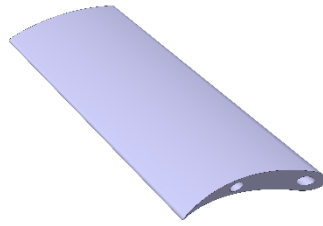


FIGURA 6.44: resultado final del modelado del aspa.

6.10. Cigüeñal

El cigüeñal es una parte del motor que se encarga de llevar el pistón del punto muerto superior al punto muerto inferior, incluso cuando no estamos acelerando el motor, esto es debido a los contrapesos del cigüeñal que actúan como volante de inercia.

Lo más habitual en el mundo del motor es encontrar un cigüeñal de acero forjado (38) que convierta el movimiento lineal de los pistones en movimiento rotatorio. Este cigüeñal trabaja precisamente también con este concepto de transformación de movimiento, esto es gracias a la excentricidad que se ha generado en el cigüeñal que esta conectado a las bielas.

La diferencia de este cigüeñal es que las bielas no van conectadas a él, si no que van conectadas a la biela madre y es solo esta, la que tiene conexión con el cigüeñal.



FIGURA 6.45: cigüeñal típico de un MCIA donde se aprecian perfectamente las excentricidades y los contrapesos. (39)



FIGURA 6.46: cigüeñal típico de motor radial, se aprecia la cavidad donde iría alojada la biela madre. (39)

6.10.1. *Modificaciones respecto a los planos iniciales*

Para favorecer su montaje el cigüeñal se divide en dos partes, el cigüeñal 1 será el más cercano al aspa y las bielas y el cigüeñal 2 será el que estará en contacto con la manivela de movimiento.

Para unir ambos cigüeñales se han estudiado varias opciones como un roscado o varias maneras de acoplarlos, pero finalmente y atendiendo a la facilidad de fabricación y acople de la pieza, se ha decidido realizar un sobre eje o casquillo de unión con taladros para fijar ambos cigüeñales.

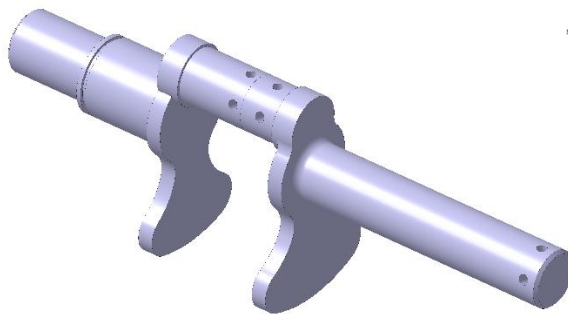


FIGURA 6.47: imagen del resultado de cómo deben quedar acoplados los cigüeñales. A la izquierda el cigüeñal 1 y a la derecha el cigüeñal 2. En la parte central excéntrica debe ir el casquillo con los taladros.

6.10.2. *Modelado del cigüeñal 1*

Para el modelado de este cigüeñal, la primera operación que se realiza es una extrusión de una circunferencia que es la que irá roscada y alojada en el taladro del cono. Seguidamente, se usa la operación 'Shaft' para realizar medio perfil y revolucionarlo con respecto al eje de la dirección de extrusión.

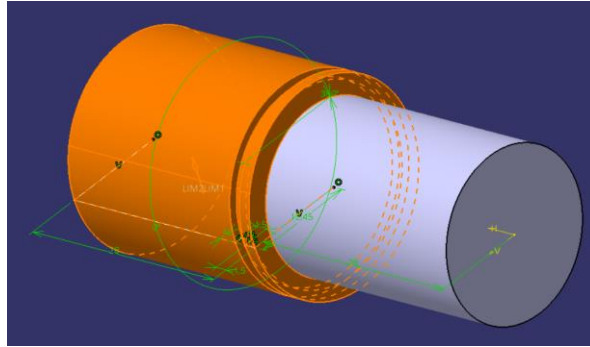


FIGURA 6.48: dos primeras operaciones del cigüeñal, en naranja el cuerpo de revolución creado.

El siguiente paso es una extrusión para generar el contrapeso del cigüeñal y otra extrusión donde irá acoplado el otro cigüeñal. Tras generar los redondeos pertinentes para evitar concentradores de tensión y taladrar la zona donde irán conectados los cigüeñales, el resultado es el siguiente.

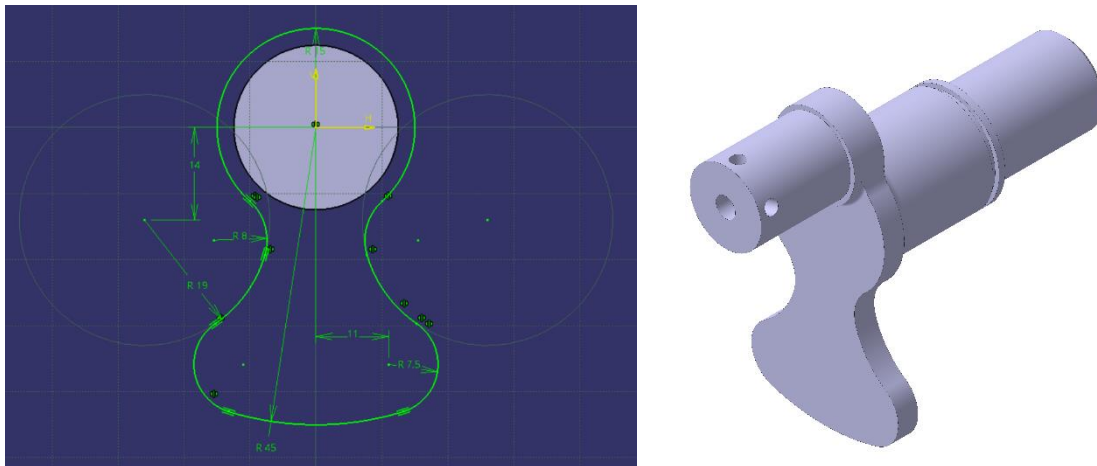


FIGURA 6.49: a la izquierda el 'sketch' del contrapeso del cigüeñal. A la derecha el resultado tras modelar los taladros, las extrusiones y los redondeos ya nombrados.

6.10.3. Modelado del cigüeñal 2

El modelado del cigüeñal 2 es prácticamente el mismo que el cigüeñal 2, con la única diferencia de que no se modela el volumen de revolución y se modela un solo eje del mismo diámetro desde la conexión con la manivela de movimiento hasta el contrapeso como se puede apreciar en la siguiente figura.

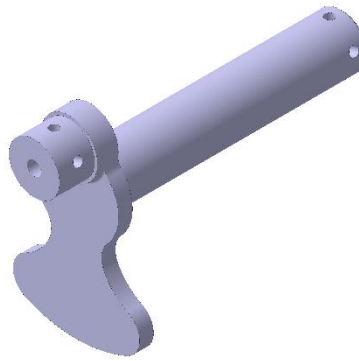


FIGURA 6.50: modelado del cigüeñal 2 con el eje del mismo diámetro más extendido.

6.11. Válvula de entrada

Las válvulas pertenecen al sistema de distribución de un motor y son las encargadas de abrirse y cerrarse en función del momento del ciclo en el que esté la cámara de combustión. Hay varios tipos de válvulas en el mercado, en este caso se usan válvulas accionadas por levas y muelles mediante varillas.

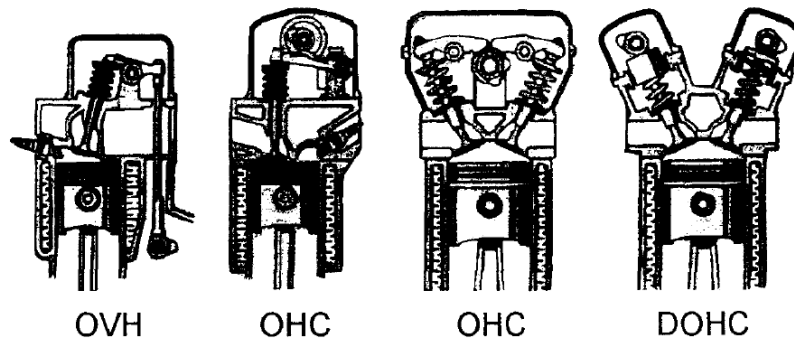


FIGURA 6.51: distintas disposiciones de válvulas y árbol de levas.

La colocación de las válvulas depende del tipo de culata que se este utilizando en este caso usaremos válvulas de plato colocadas de manera vertical. Para las válvulas de admisión se utiliza el acero al carbono de aleación de silicio cromado, sin embargo, para las altas temperaturas de las válvulas de escape se usa acero al carbono de aleaciones de silicio y níquel-cromo. (40)

6.11.1. Parámetros de la válvula de admisión

Una vez más, al igual que se hizo para hallar los parámetros de la cavidad de entrada de la culata, usaremos la imagen obtenida de (24) para calcular, en este caso, las dimensiones de la válvula de admisión.

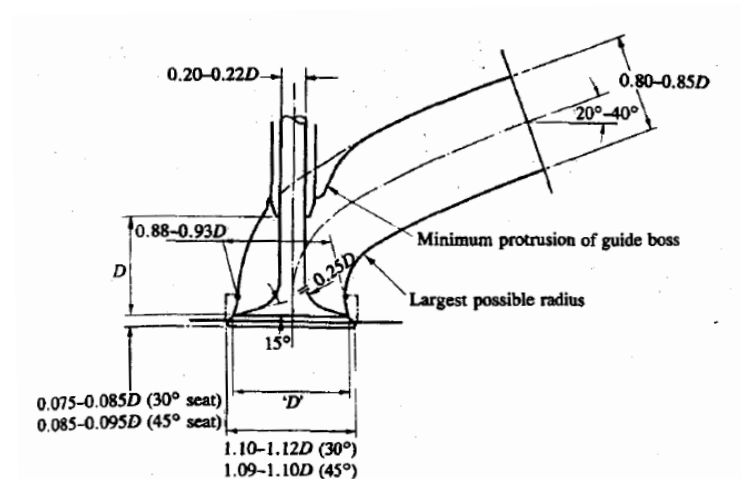


FIGURA 6.52: imagen donde se obtendrán las recomendaciones de modelado de la válvula de admisión.

- El diámetro de la espiga, que es la parte más fina que conecta el plato con el muelle debe tener entre $0,2-0,22 D$, siendo D el diámetro del plato de la válvula, que se eligió un valor de 9 mm. El diámetro de la espiga será de 1,98 mm.
- El chaflán de la parte inferior de la válvula se ha elegido un ángulo de 45° que es el mismo chaflán que se hizo en el asiento de la válvula de la culata.
- El diámetro inferior del plato de la válvula debe estar entre $1,09$ y $1,10 D$ y se decide que tenga un valor de 9,9 mm.
- El radio de acuerdo o redondeo entre la espiga y el plato debe ser de $0,25 D$ y por lo tanto el valor el radio es 2,25 mm.
- El tramo recto entre la espiga y el plato será de 15° .

6.11.2. Modelado de la válvula de admisión

Este modelado es bastante rápido gracias a la herramienta para crear volúmenes de revolución y siguiendo los parámetros indicados anteriormente podemos construir la válvula con solo dos operaciones.

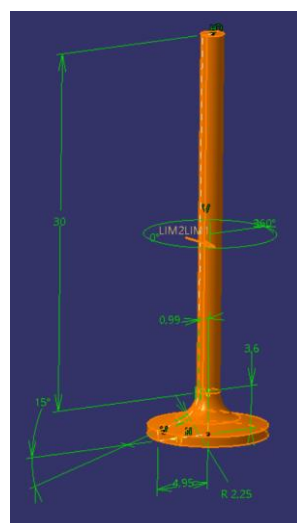


FIGURA 6.53: imagen de la primera operación de revolución.

La última operación que se hace en la válvula es el chaflán de 45°, quedando el siguiente resultado.



FIGURA 6.54: modelado de la válvula de admisión.

6.12. Válvula de escape

Análogamente, la válvula de escape se modela y se diseña de manera muy similar a la válvula de admisión, incluyendo algunos cambios que se indicarán a continuación.

6.12.1. Parámetros de la válvula de escape

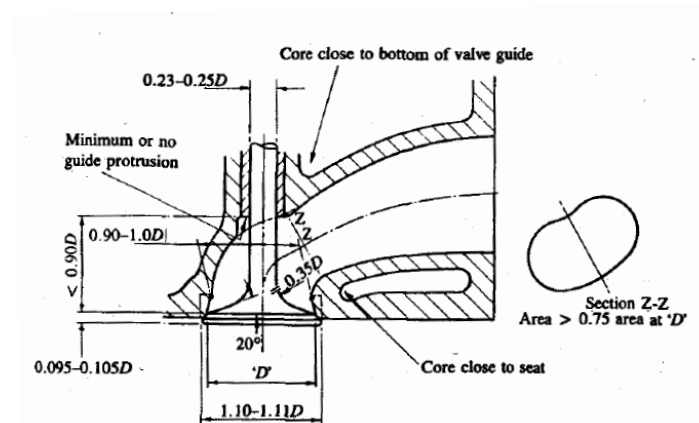


FIGURA 6.55: imagen de donde se extraerán las dimensiones recomendadas para el diseño de la válvula de escape.

- El diámetro de la espiga debe tener entre $(0,22-0,25) D$ y el valor será 2,25 mm.
- El chaflán de la parte inferior de la válvula se ha elegido un ángulo de 45°.
- El diámetro inferior del plato de la válvula debe estar entre 1,10 y 1,11 D y se decide que tenga un valor de 9,9 mm.
- El radio de acuerdo o redondeo entre la espiga y el plato debe ser de $0,35 D$ y por lo tanto el valor el radio es 3,15 mm.
- El tramo recto entre la espiga y el plato será de 20°.

6.12.2. Modelado de la válvula de escape

De nuevo, al igual que pasaba con la válvula de admisión, con dos sencillas operaciones se construye la válvula de escape. Un volumen de revolución siguiendo las recomendaciones del autor y un chaflán para sellar correctamente el alojamiento entre la válvula y la culata.

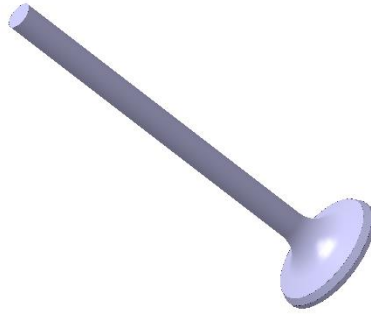


FIGURA 6.56: modelado de la válvula de escape.

6.13. Plato de levas

El plato de lóbulos pertenece al sistema de distribución del motor, encargado de abrir y cerrar las válvulas en el momento justo para asegurar el correcto funcionamiento del motor. Este sistema tiene un exhaustivo control ya que se trata de una de las tareas más importantes a realizar en el motor.

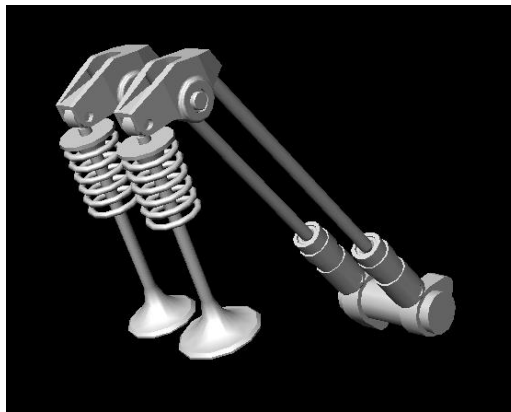


FIGURA 6.57: imagen del sistema de distribución habitual en los motores, el árbol de levas. (41)

El motor de este proyecto es un motor radial y por lo tanto es imposible la incorporación de un árbol de levas convencional, por lo tanto, se diseña un plato de levas para este sistema de distribución. El resto de piezas del sistema se detallarán más adelante.

Este plato, será un disco en el que ciertas porciones tendrán distintas formas para generar, de manera alterna, esa apertura y cierre de válvulas de admisión y de escape. (36)

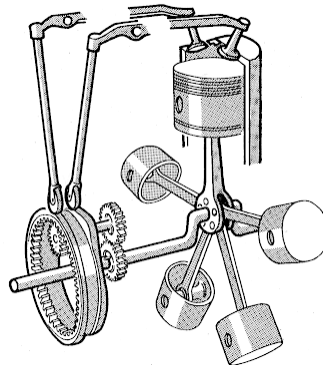


FIGURA 6.58: sistema de distribución junto con bielas y pistones. (36)

En la *Figura 72* se observa, además, el sistema de engranajes y la palanca de movimiento que se detallarán más adelante y que forman parte del sistema de distribución de este motor. Habrá dos discos, uno para la apertura y otro para el cierre de válvulas. Una cuestión importante es, el número de levas que se deben diseñar por cada plato y en total, operación que se resuelve de la siguiente manera:

$$N_L = \frac{N \pm 1}{2} \quad (7)$$

- N representa el número de cilindros del motor que en este caso es 7.
- El signo puede ser positivo o negativo dependiendo del sentido de giro del plato con respecto al cigüeñal.
Si el plato gira en el mismo sentido del cigüeñal el signo es positivo y si el plato gira en el sentido contrario al cigüeñal el signo es negativo.

En este proyecto habrá un único engranaje exterior y por lo tanto el plato girará en sentido contrario al cigüeñal y el signo será negativo, quedando la siguiente expresión.

$$N_L = \frac{7-1}{2} = 3 \frac{\text{levas}}{\text{disco}} \quad (8)$$

Habrà tres levas por disco y en total seis levas en los dos discos. Estos platos estarán en contacto con unos rodillos llamados ‘seguidores’ que son los que transmiten el movimiento a las varillas que hacen que la palanca se mueva y abra y cierre la válvula oportuna en el momento justo.

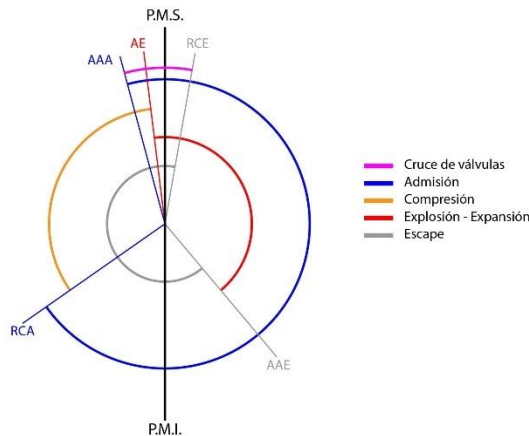


FIGURA 6.59: esquema de la distribución variable de las válvulas en función del momento del ciclo termodinámico.[46]

La *Figura 73* es una representación de la apertura y cierre de cada válvula en función del ciclo termodinámico. Como se puede observar la apertura y cierre no siempre es justo cuando empieza o termina una transformación del ciclo si no que siempre se acciona antes del comienzo del ciclo siguiente, incluso hay un momento en el que las válvulas se cruzan y coincide que están abiertas. Esto hace que el plato de levas, a parte

de todos los controladores que necesitan este sistema, sea fundamental para que este esquema se cumpla.

6.13.1. Modelado del plato de levas

El plato de levas contiene discos con tres levas cada uno unidos por un pequeño disco concéntrico, además, cada disco llevará unas guías que harán de carril para los seguidores. La primera operación es el modelado mediante extrusión del primer disco. Seguidamente se modela la primera leva con el comando 'Spline' que genera alambres con la forma que el usuario quiera modelar.

Seguidamente, se utiliza la herramienta de patrón para replicar esta leva dos veces más alrededor del disco.

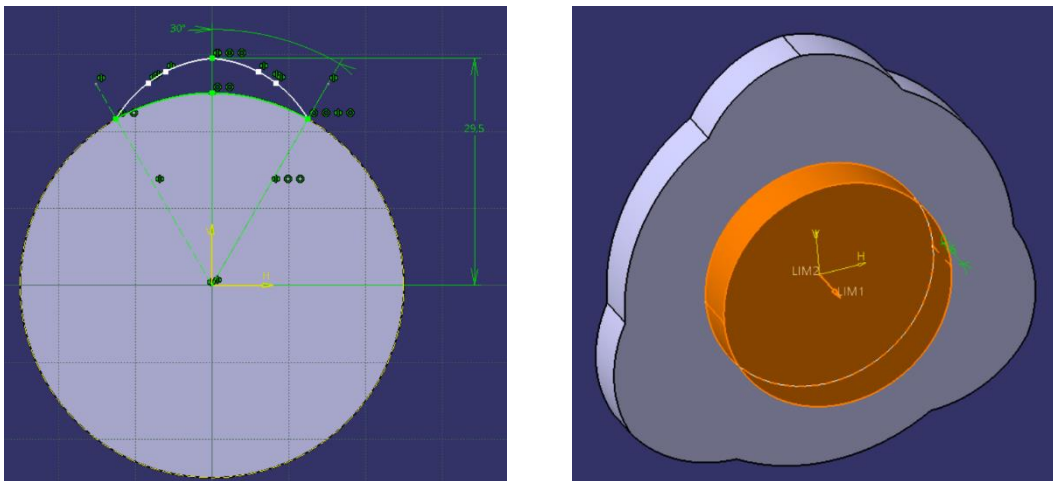


FIGURA 6.60: a la izquierda: 'spline' utilizada para crear la leva junto con la primera extrusión. A la derecha: las levas del primer disco junto con la unión entre discos.

Como se puede apreciar en la Figura 74, a la derecha se representa la extrusión de la circunferencia concéntrica que servirá de unión entre discos. Tras la unión de discos se modela el otro plato de levas, alternando sus posiciones, consiguiendo que cuando un plato se encuentre en el punto más alto de la leva, el otro plato esté en el punto más bajo del disco. Para ello se utiliza el mismo 'sketch' del primer disco, pero esta vez le realizamos un giro de 30°. Además, se redondean las aristas que se generan entre discos y unión.

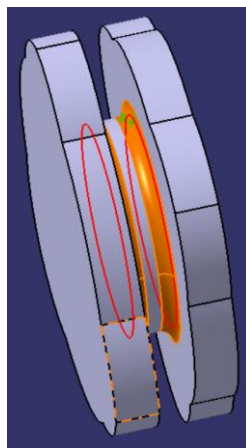


FIGURA 6.61: imagen de ambos platos de levas junto con los redondeos entre plato y unión.

Finalmente, se modela el taladro donde pasará el cigüeñal y se modelan los carriles por donde pasarán los rodillos.

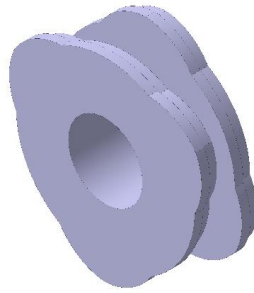


FIGURA 6.62: modelo final del plato de levas.

6.14. Sistema de engranajes

Las revoluciones del cigüeñal no deben ser las mismas que el plato de levas, por la velocidad de apertura y cierre de válvulas. Aquí es donde será fundamental el uso de un tren de engranajes para reducir esas revoluciones un cierto valor que se calculará a continuación.

$$\alpha = \frac{1}{2 \cdot N_L} = \frac{1}{2 \cdot 3} = \frac{1}{6} \quad (9)$$

La idea, por lo tanto, es modelar un sistema de engranajes que reduzca seis veces la velocidad del plato de lóbulos para que se produzca una buena sincronía con las válvulas y los pistones. En el *Anexo 1* se realizarán los cálculos de toda la geometría de los engranajes incluyendo dientes y envolventes.

6.14.1. Modelado del sistema de engranajes

En el *Anexo 1* se detalla más a fondo la construcción de todos los dibujos y perfiles para el modelado de los engranajes, en este apartado el procedimiento seguido que aparece en el libro de la bibliografía recomendada de la asignatura '*Diseño de Máquinas*' que se cursa en el cuarto año. (42)

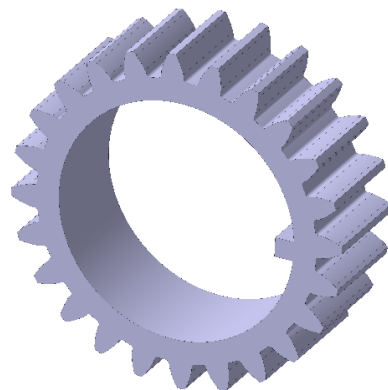
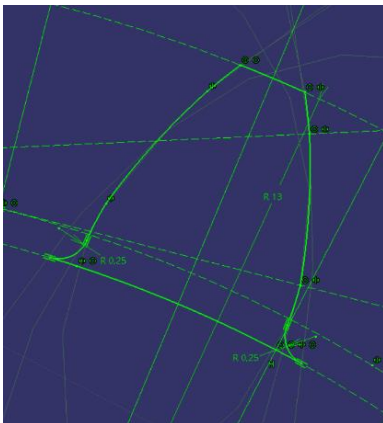


FIGURA 6.63: a la izquierda: 'sketch' del diente del engranaje 1. A la derecha: el modelado final del engranaje 1 junto con el agujero donde pasará el cigüeñal.

Una vez se realiza la construcción del diente del primer engranaje, se le realiza una extrusión al *'sketch'* y se modela un patrón circular para generar todos los dientes del engranaje junto con el resto del sólido, incluyendo el taladro donde pasará el cigüeñal.

Para el segundo engranaje se modela un cilindro hueco adherido a los dientes para encajar mediante un tornillo con el siguiente engranaje, el resultado es el siguiente.

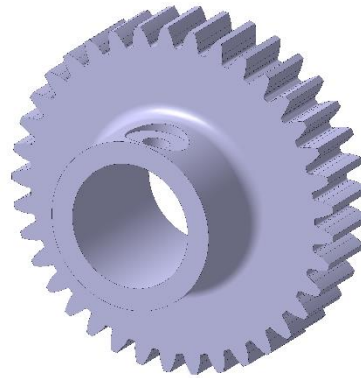
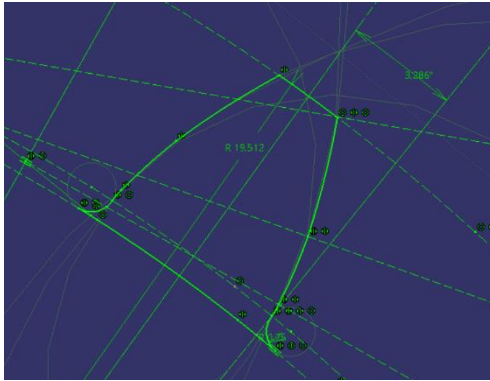


FIGURA 6.64: a la izquierda: *'sketch'* del diente del engranaje 2. A la derecha: el modelado final del engranaje 2 junto con el alojamiento del engranaje 3.

El tercer engranaje que se modela es el que va unido mediante tornillería al engranaje 2, al igual que el resto se modela el diente del engranaje y se realiza un patrón circular para generar todos los dientes del engranaje.

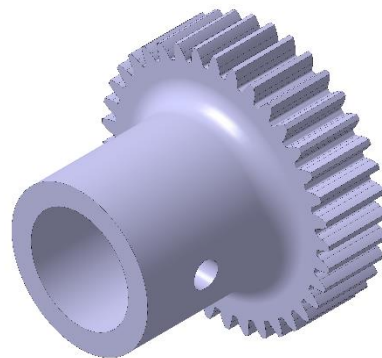
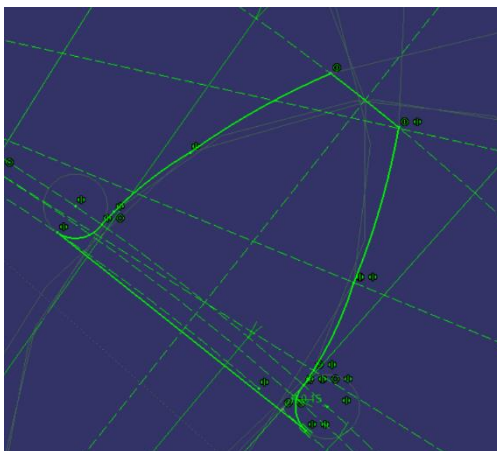


FIGURA 6.65: a la izquierda: *'sketch'* del diente del engranaje 3. A la derecha: el modelado final del engranaje 3.

El cuarto y último engranaje se modela de manera diferente, el *'sketch'* del resto de engranajes se modela mediante una extrusión y un patrón circular para generar todos los dientes del engranaje, en este caso, el dibujo se usa para hacer un vaciado en un sólido y así generar una envolvente para los dientes del engranaje 3. Se construye dejando un taladro concéntrico para que pase el cigüeñal.

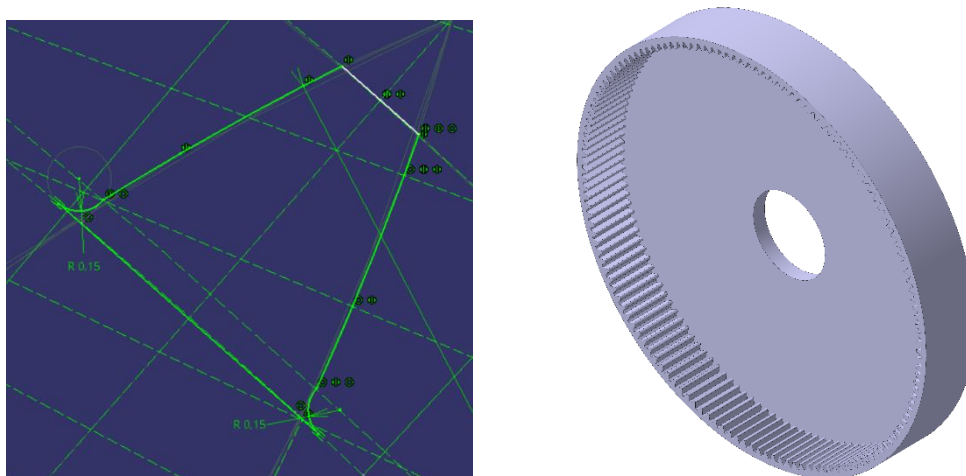


FIGURA 6.66: a la izquierda: 'sketch' del diente del engranaje 4. A la derecha: el modelado final del engranaje 4.

6.15. Varilla, alojador de varilla, seguidor, palanca y soporte de palanca

La mayoría de estas piezas se modelan mediante extrusiones y vaciados sencillos, es decir, que en uno o dos pasos se pueden construir estos componentes. Estas piezas irán junto a la culata y al plato de levas y se encargarán del movimiento alternativo de apertura y cierre de las válvulas. Los modelos son los siguientes:

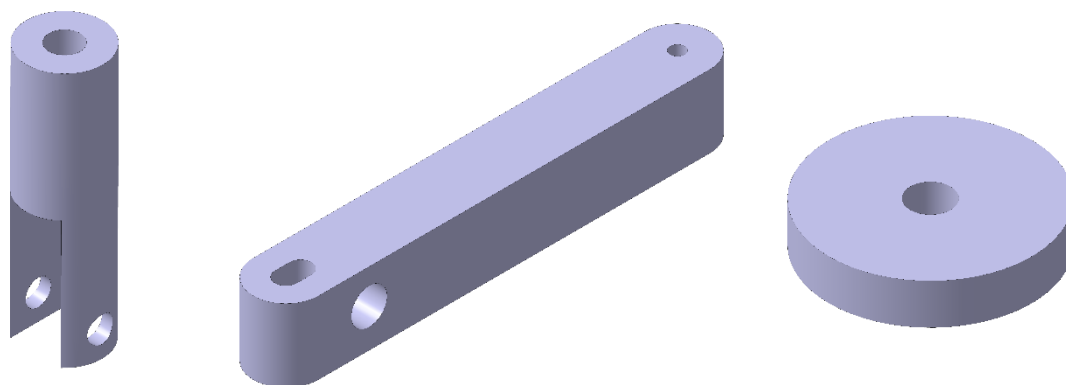


FIGURA 6.67: a la izquierda: alojador de la varilla. En el centro: palanca. A la derecha: seguidor.

Para el soporte de la palanca se he decidido dividir la pieza en dos para facilitar un posible mantenimiento y evitar que una palanca dependa de la otra. La palanca tiene un taladro en la cara superior el cual no tiene forma circular, todo para que la tuerca pueda tener cierto movimiento ya que es una pieza sometida al giro transmitido por la varilla y el seguidor.

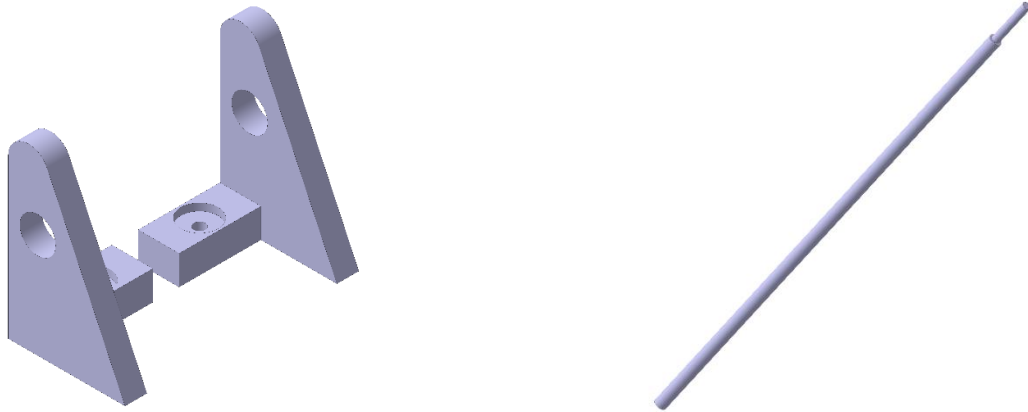


FIGURA 6.68: a la izquierda: soporte de palanca. A la derecha: varilla.

6.16. Manivela de movimiento

Esta manivela es lo que se usaría para poner el motor en movimiento en el caso de una supuesta fabricación o prototipado del conjunto al completo. La manivela tiene el mismo diámetro del cigüeñal 2, al cual irá unido mediante un casquillo con taladros. Se modela gracias a la herramienta de *'Multi-Section Solid'*, dibujando circunferencias del mismo diámetro por donde queramos que se vaya desarrollando el cuerpo y se dibuja una guía en forma de alambre.

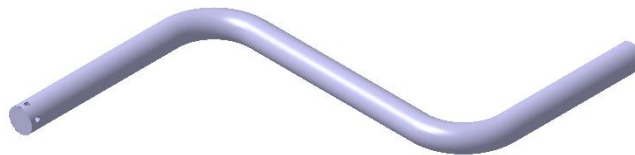


FIGURA 6.69: manivela de movimiento

7. ENSAMBLAJE DEL MOTOR

Este apartado tratará los tipos y maneras de ensamblado que existen y la manera adoptada en este proyecto. Además, se irán mostrando los tipos de restricciones de posición o ángulo utilizadas en los ensamblajes para que finalmente se obtenga el motor completo y sea funcional.

Se mostrarán vistas explosionadas de los conjuntos utilizados junto con el procedimiento para añadir la tornillería utilizada. Para estas tareas se usará el módulo de *Assembly Design* que viene incorporado en el programa.

7.1. Procedimientos de ensamblaje

En CATIA existen tres tipos de ensamblajes cuando se usa este módulo.

- Ensamblaje convencional: este procedimiento de ensamblaje es el más básico que incorpora CATIA. Consiste en ir incorporando de una en una todas las piezas que queramos ensamblar, es bastante sencillo de realizar.

Los inconvenientes que tiene ese procedimiento es la cantidad de tiempo invertida añadiendo una a una las piezas y añadiéndole restricciones, además al existir tantas restricciones en un mismo ensamblaje puede que ocurran interferencias no deseadas entre piezas que dificultan el ensamblado.

- Ensamblaje mediante subconjuntos: el uso de este procedimiento de ensamblado acelera y facilita la introducción de piezas y sus restricciones. Este procedimiento consiste en agrupar pequeños grupos de piezas que vayan ensamblados en el conjunto total y ensamblarlas por separado para añadir las posteriormente como subconjunto al conjunto completo.

Esto descarga bastante el ensamblaje de interferencias entre restricciones y acelera el proceso. Para poder introducir estas restricciones debemos añadir el subconjunto como ‘subconjunto flexible’ que hace posible esta acción, si no, el subconjunto quedaría rígido y no se tendría la posibilidad de combinarlo con otros ensamblajes.

- Ensamblaje posicional: este ensamblaje solo posiciona las piezas en el lugar que se elija en función de otra pieza. Es rápida y efectiva pero no tiene ninguna funcionalidad. Se suele utilizar para la generación de planos de montaje en los que solo interesa que las piezas estén en su sitio sin ninguna intención de hacer funcionar el archivo 3D. Para ello se usa la herramienta ‘*Snap*’.

En este proyecto se ha escogido el ensamblaje mediante subconjuntos ya que resulta más sencillo y rápido. Además, se convierte en un proyecto parametrizado, ya que, al tener subconjuntos conectados con el conjunto final, todo lo que se modifique en un subconjunto se modifica en el conjunto final en todos los ejemplares de ese subconjunto modificado.

7.2. Subconjuntos realizados

En este apartado se explicará detalladamente el proceso de ensamblado de los subconjuntos utilizados en el proyecto. Durante todo este proceso las restricciones utilizadas para darle forma al motor final han sido:

- Coincidence constraints: hace coincidir superficies, aristas o ejes de dos piezas distintas, en este proyecto en la totalidad de las restricciones se han hecho coincidir ejes como, por ejemplo, la tornillería en su taladro correspondiente.
- Offset constraints: establece una distancia entre dos superficies, aristas o ejes que se mantiene fija, se usa sobre todo para centrar alguna pieza en su lugar correspondiente.
- Angle constraints: define un ángulo entre ejes de piezas distintas, sobre todo es muy útil para establecer paralelismos entre ejes.
- Fix component: se fija una pieza para que sea la pieza de referencia en este caso ha sido el cuerpo del motor.

7.1.1. Subconjunto cono-aspas

El primer subconjunto que se realizará será el del cono y las tres aspas que recibirán el movimiento rotatorio del cigüeñal. Primeramente, se abre un archivo 'Product' donde usaremos el módulo de *Assembly Design* y se irán añadiendo las piezas ('parts'), en este caso el cono y las aspas. Se añaden las aspas una a una ya que no resulta un trabajo costoso y usar el patrón circular daba problemas.

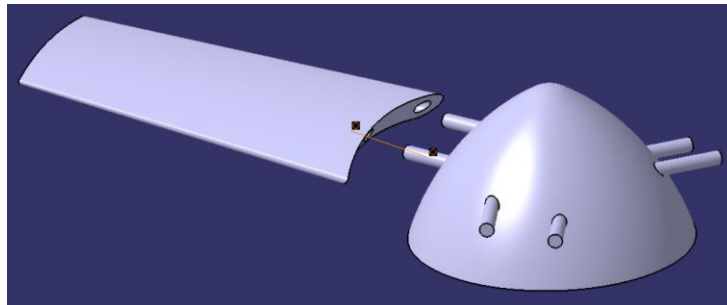


FIGURA 7.1: restricción de coincidencia entre el eje del saliente del cono y el taladro del aspa.

Mediante el icono de esta restricción y seleccionando los dos ejes que queremos hacer coincidir, las piezas se unen. Además, se hace coincidir el eje de revolución del cono con el eje de la curvatura de la superficie taladrada de las aspas, quedando esta, fija y encajando en su lugar correspondiente.

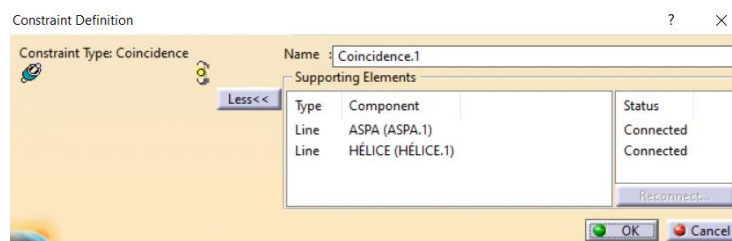


FIGURA 7.2: ventana donde aparece la restricción y se puede configurar

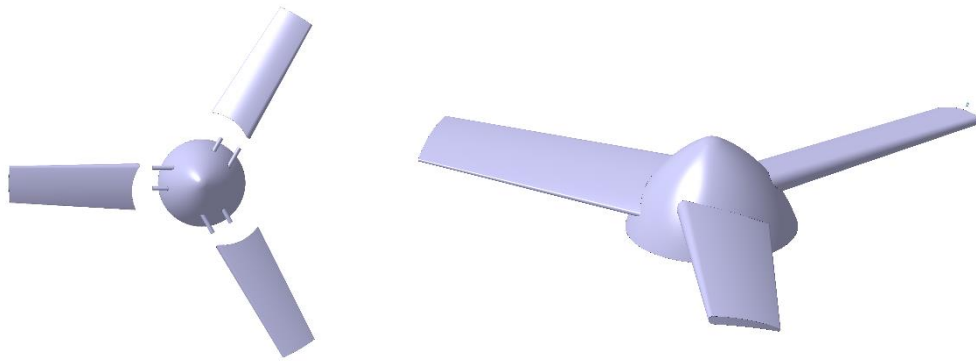


FIGURA 7.3: a la izquierda: vista explosionada del subconjunto cono-aspas. A la derecha: vista isométrica del subconjunto cono-aspas.

7.1.2. Subconjunto cilindro-palancas

Este subconjunto comprende las siguientes piezas:

- Cilindro
- Pistón
- Biela
- Válvula de admisión
- Válvula de escape
- Rodillo seguidor
- Varilla
- Alojador de varilla
- Bulón biela-biela madre
- Bulón biela-pistón
- Circlip biela -biela madre
- Circlip biela-pistón
- Palanca
- Soporte de palanca
- Muelles
- Elementos de unión entre cilindro y cuerpo
- Elementos de unión entre culata y cilindro
- Elementos de unión entre culata y soporte de palanca
- Elementos de unión entre seguidor y alojador de varilla
- Elementos de unión entre palanca y soporte de palanca
- Circlips bulón biela-biela madre
- Circlips bulón biela-pistón

Los elementos de unión y los circlips se han escogido del catálogo que viene incorporado en el software de CATIA, en siguientes apartados se detallará este proceso de decisión y acoplamiento de estos elementos.

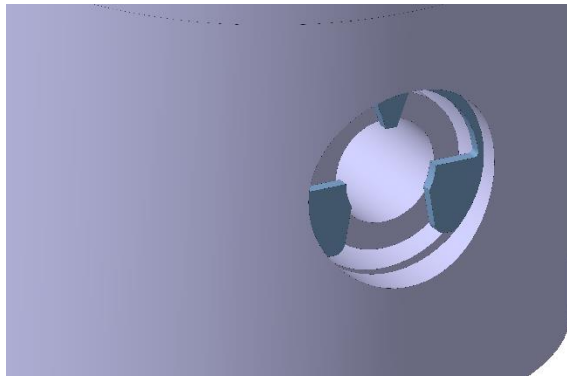


FIGURA 7.4: ranura en el pistón para añadir circlips.

Para añadir fijación en el bulón, se ha decidido usar circlips, que son unos anillos retenedores escogidos, también, en el catálogo de *CATIA*. Para los circlips y para el resto de piezas del subconjunto se han utilizado restricciones de coincidencia y de distancia.

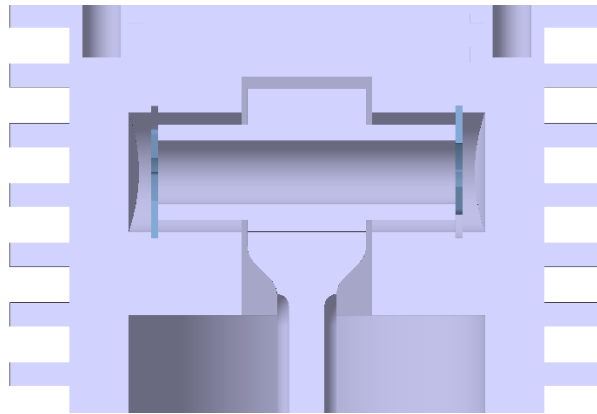


FIGURA 7.5: corte donde se muestra la situación centrada de bulón, sobre eje y biela.

La restricción de distancia se ha usado para colocar la biela justo en el centro de la ranura, encajando con el sobre eje y con el bulón, evitando así roces con las paredes de la ranura y la pérdida de movimiento.

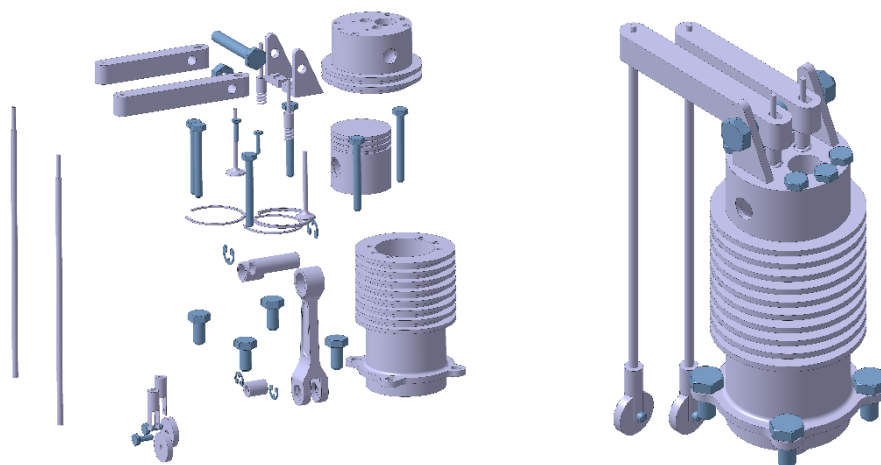


FIGURA 7.6: a la izquierda: vista explosionada del subconjunto cilindro-palancas. A la derecha: vista isométrica del subconjunto cilindro-palancas.

7.1.3. Subconjunto del sistema de engranajes

Este subconjunto cuenta con los cuatro engranajes diseñados y con un tornillo y tuerca para unir dos engranajes. El cigüeñal se inserta en el cuarto engranaje, mientras que las ruedas dentadas dos y tres, conectadas entre sí, transmiten el movimiento desde el cuarto engranaje al primero.

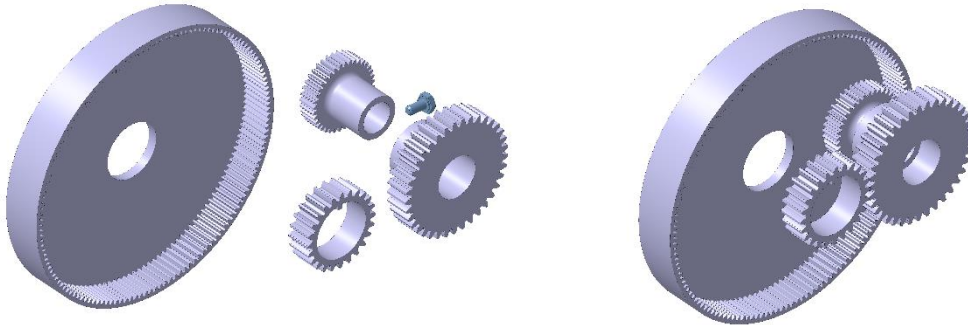


FIGURA 7.7: a la izquierda: vista explosionada del sistema de engranajes. A la derecha: vista isométrica del tren de engranajes ensamblado.

Al igual que el resto de subconjuntos se han utilizado restricciones de coincidencia para ir engranando los ejes de las ruedas dentadas, además, para la unión de las ruedas 1 y 2 se ha intentado que no ocurran colisiones entre dientes de los engranajes para añadirle realismo. En esto intervendría el comportamiento dinámico del sistema, cosa que no entra en los objetivos del proyecto.

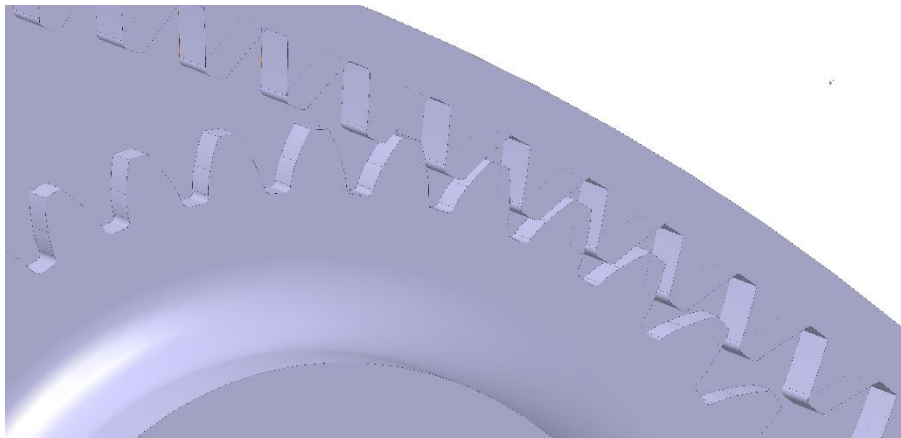


FIGURA 7.8: imagen de los dientes de las ruedas 1 y 2 en contacto simulando el comportamiento dinámico del tren de engranajes.

7.3. Ensamblaje completo

Una vez que se dispone de los subconjuntos adecuados, se ensamblan con el resto de piezas construyendo el motor finalmente. Para empezar, se ensambla el subconjunto de cono-aspas con el cuerpo del motor. Para esta unión se incluye también el cigüeñal 1, que será el que servirá de unión entre cono y cuerpo.

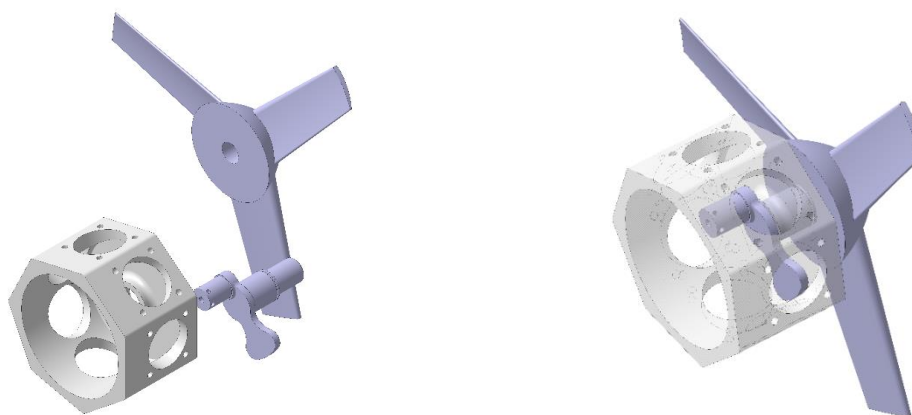


FIGURA 7.9: a la izquierda: las tres componentes de la primera unión del conjunto motor. A la derecha: vista del primer ensamble del motor.

Seguidamente se ensambla una variante del subconjunto cilindro-palancas. Esta variante tiene la biela madre en lugar de la biela, el taladro mayor de la biela madre se adapta al cigüeñal 1, además, la tornillería del cilindro encaja en una de las siete caras laterales del cuerpo del motor, siendo el resultado el siguiente:

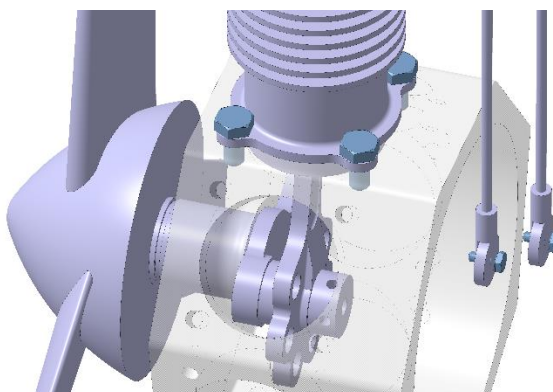


FIGURA 7.10: subconjunto cilindro-palancas ensamblado con el cigüeñal 1 y con el cuerpo del motor.

Una vez se tiene la biela madre ensamblada con el cigüeñal 1, se pueden incorporar el resto de subconjuntos cilindro-palancas con biela. Se realiza la misma operación, restricciones de coincidencia entre el bulón biela-biela madre y la misma biela madre junto con la restricción de coincidencia entre la cara del cilindro y el cuerpo y entre los ejes del tornillo y el taladro del cuerpo.

Es importante que se orienten las varillas hacia el lado contrario del cono y las aspas para que pueda acoplarse con el plato de levas. Al tener un subconjunto cilindro-palancas con biela ensamblado correctamente, se aplica la herramienta de *'reused circular pattern'* que se encarga de reutilizar un patrón circular ya existente en el modelado de la pieza e incorpora otros componentes usando el mismo patrón.

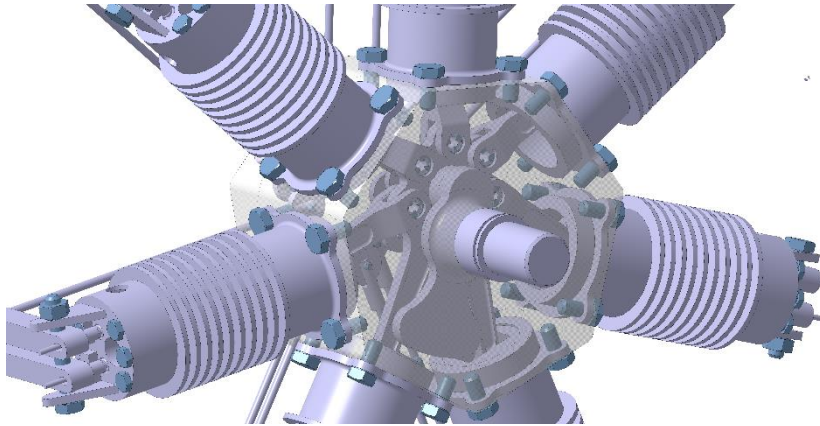


FIGURA 7.11: todos los cilindros ensamblados junto con el cigüeñal y el cuerpo del motor (se ha ocultado el subconjunto cono-aspas para facilitar la visión de las bielas).

A continuación, se añade el cigüeñal 2 junto con el plato de levas. Los cigüeñales se unen y se añade una restricción de paralelismo entre los taladros de los cigüeñales para que quede de la siguiente manera:

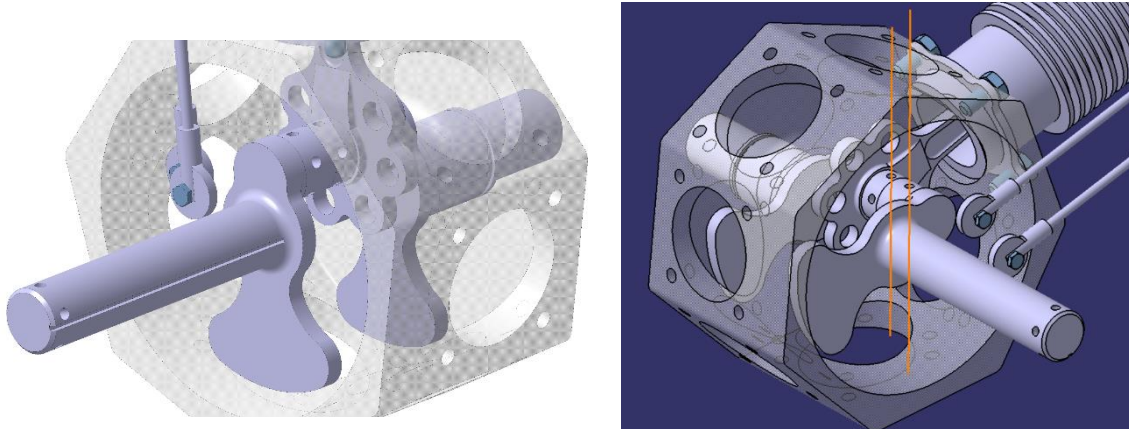


FIGURA 7.12: a la izquierda: vista de los cigüeñales unidos en su posición correcta gracias a la restricción de paralelismo de los ejes de los taladros que se muestran en la imagen derecha.

Los platos de levas y el sistema de engranajes se alojan en el segundo cigüeñal, se le aplica una restricción de coincidencia de ejes y se colocan en el lugar adecuado para que el seguidor conectado a la culata pueda realizar su función, se recuerda que el movimiento del seguidor no se tiene en cuenta en este proyecto ya que incluiría una trayectoria con fines dinámicos y no puramente geométricos.

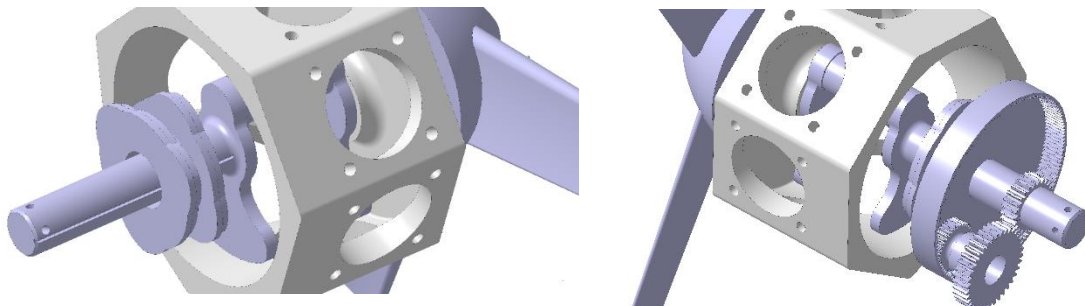


FIGURA 7.13: a la izquierda la incorporación del plato de levas y a la derecha la incorporación del sistema de engranajes.

Finalmente, se añade la manivela de movimiento para hacer girar al motor y se une al cigüeñal 2 con el casquillo de unión y diez tornillos para fijarla. Este sería el último paso y ya estaría el motor radial ensamblado, al girar la manivela se mueven de manera alternativa los pistones y giran las aspas.

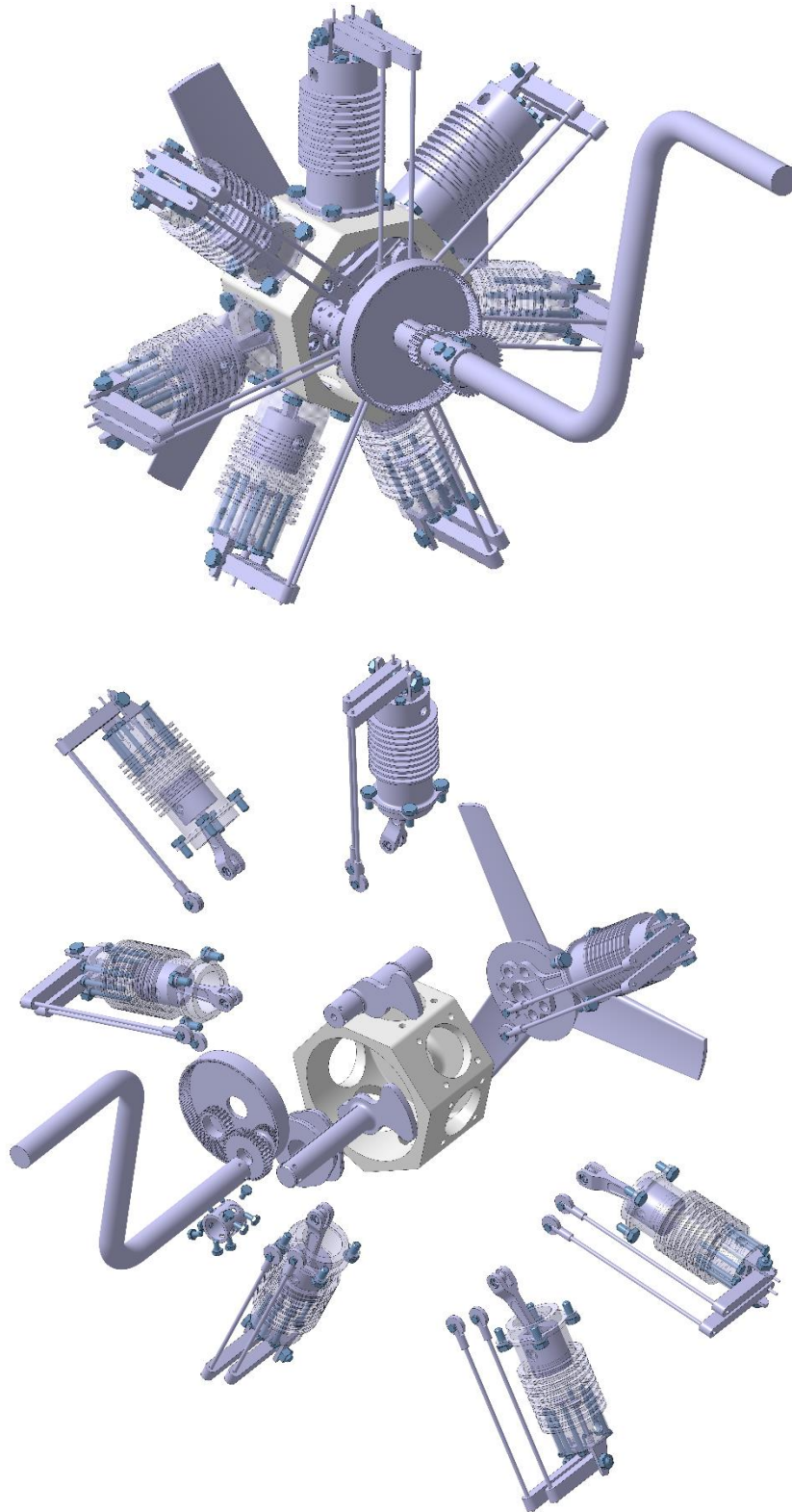


FIGURA 7.14: arriba: vista del conjunto al completo con la incorporación de la manivela de movimiento y el casquillo de unión. Abajo: vista explosionada del conjunto dividido por subconjuntos y los nuevos componentes añadidos.

7.4. Tornillería

En este proyecto se han escogido elementos de unión del catálogo de *CATIA*, los tornillos y tuercas de métrica *ISO* y los circlips de métrica *ASME*. El tornillo escogido dispone de una superficie especial en la cara inferior de su cabeza para evitar el uso de arandelas y para proteger dicha cabeza del rozamiento y desgaste.

Se recuerda que para los circlips se han modelado unas ranuras para su adaptación. Para acceder al catálogo se puede abrir la pestaña '*Tools*' o se puede hacer uso del icono de catálogo que debe aparecer en la parte inferior de la interfaz de *CATIA*. El procedimiento para escoger los elementos de unión es el siguiente.

- Primeramente, se escoge el tipo de normativa en el catálogo, aparecerá una ventana emergente en la cual se escogerá que tipo de elemento de unión se quiere incorporar al proyecto.

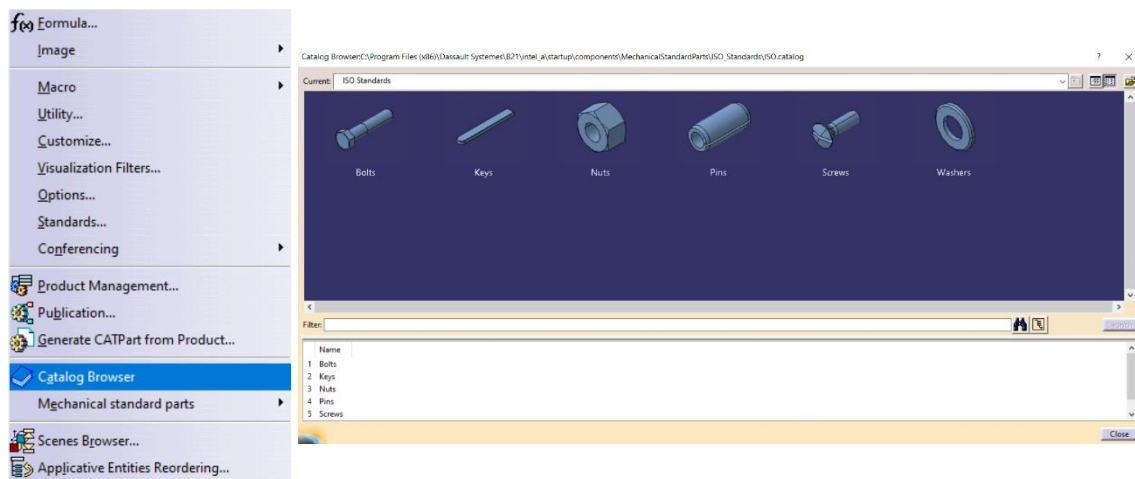


FIGURA 7.15: a la izquierda: pestaña '*Tools*' donde se abrirá el catálogo. A la derecha: la ventana del catálogo donde se escogerá el tipo de elemento de unión, para este ejemplo, se abrirá la sección '*Screws*'

- Al abrir la sección de '*Screws*' aparecerán todo tipo de tornillos que se escogerán en función de las necesidades de cada producto, en este caso se han escogido los tornillos '*ISO 4017 GRADES A B HEXAGON HEAD SCREW*'. Al abrir estos tipos de tornillos, aparecerán todas las métricas y longitudes posibles para esta clase de tornillo.

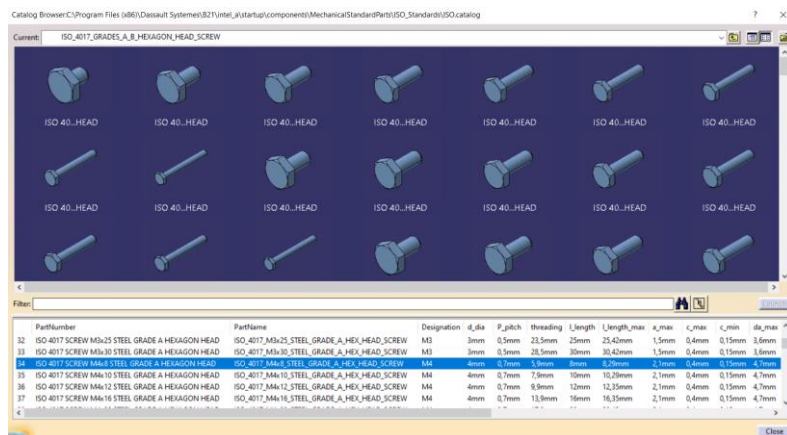


FIGURA 7.16: toda la gama de métricas y longitudes de perno disponible en este tipo de tornillo.

- Como se ve marcado en la *Figura 7.16*, para este ejemplo, se escoge el tornillo de métrica *M4x8*. Esta elección es en función de la geometría del taladro y de las piezas a su alrededor. Una vez se ha escogido se abre el tornillo y aparece en la sesión donde se estaba trabajando, listo para aplicarle restricciones de posición.

Como se ha podido observar los tornillos vienen clasificados como, por ejemplo, *M4x8*, donde el número cuatro representa el diámetro del perno y el número ocho la longitud del vástago.

Las tuercas vienen definidas simplemente con la letra '*M*' seguida del número que representa el diámetro del taladro.

Para los circlips se ha tenido que buscar en otra normativa, se ha escogido la normativa *ASME*, el procedimiento es el mismo al resto de elementos de unión y son piezas que vienen representadas en el catálogo con un tres seguido de un código de dos letras junto con el diámetro interior de la pieza.

En resumen, se han utilizado los siguientes elementos de unión.

Elemento de unión	Modelo	Cantidad
TUERCAS	ISO 4032 NUT M3 STEEL GRADE A HEXAGON	1
	ISO 4032 NUT M6 STEEL GRADE A WASHER FACED HEXAGON HEAD	1
TORNILLOS	ISO 4017 SCREW M6x12 STEEL GRADE A HEXAGON HEAD	28
	ISO 4017 SCREW M4x35 STEEL GRADE A HEXAGON HEAD	42
	ISO 4017 SCREW M6x40 STEEL GRADE A HEXAGON HEAD	7
	ISO 4017 SCREW M3x8 STEEL GRADE A HEXAGON HEAD	14
	ISO 4017 SCREW M2x10 STEEL GRADE A HEXAGON HEAD	14
	ISO 4017 SCREW M4x8 STEEL GRADE A HEXAGON HEAD	10
	ISO 4017 SCREW M3x6 STEEL GRADE A HEXAGON HEAD	1
CIRCLIPS	ANSI B27.7M RING 3CM1_5 STEEL EXTERNAL RETAINING E RING	12
	ANSI B27.7M RING 3CM1_6 STEEL EXTERNAL RETAINING E RING	14

Tabla 3; resumen de los elementos de unión del proyecto.

8. RENDERIZADO DEL MODELO

En este capítulo se mostrarán las imágenes del modelo renderizado, así como cada una de las piezas utilizadas en él. En el renderizado se ha utilizado la calidad máxima para la extracción de las imágenes, con el fin de obtener los mejores resultados.

Este proceso es sencillo y rápido si se dispone de unos altos recursos gráficos en el ordenador. Consiste en la aplicación de un material a las piezas, que junto a un juego de luces y sombras que el usuario configura, hace que se obtenga un resultado realista y muy útil. En este proyecto se ha decidido aplicar tungsteno a las piezas, con un fin meramente estético ya que se sabe que para la fabricación de estas piezas no se usaría este material de manera principal.

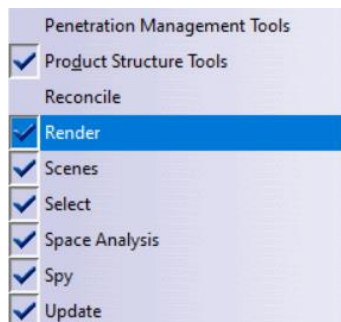


FIGURA 8.1: activación de la herramienta de renderizado

Si la herramienta de renderizado no aparece en la interfaz, se debe activar mediante la pestaña 'Toolbar', una vez activada aparecerá un icono de una cámara de fotos en la interfaz.

Primeramente, se aplica el material a todas las piezas, se dejan a parte los elementos de unión para que se distingan, después, se aplica un fondo de color negro a la escena para hacer destacar la pieza, se ajusta la iluminación mediante la bola azul de la Figura 8.2 y se realiza el renderizado.

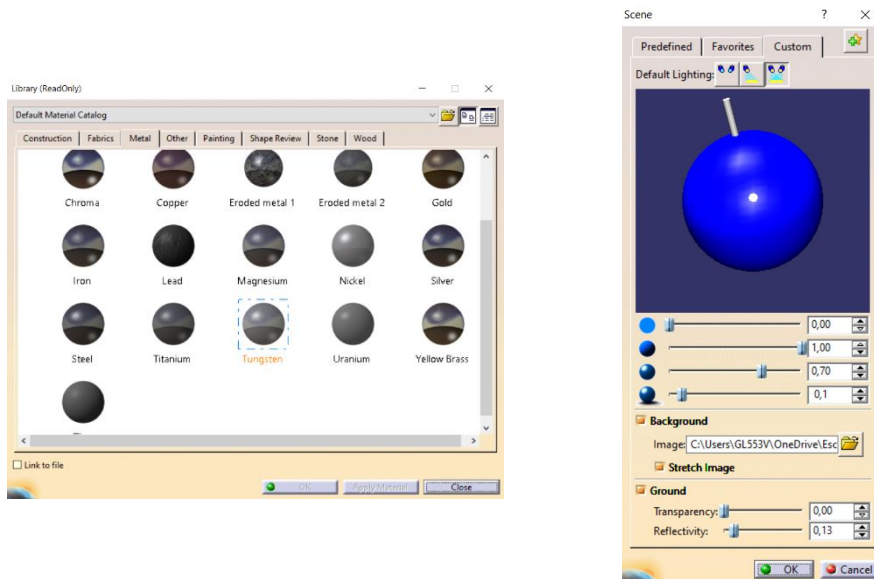


FIGURA 8.2: a la izquierda: ventana donde se aplica el material a la pieza. A la derecha ventana de configuración de la escena, en el apartado 'Background' se inserta una imagen de color negro.

8.1. Cilindro y cuerpo



FIGURA 8.3: cilindro y cuerpo del motor renderizaos

8.2. Culata, pistón y sobre eje



FIGURA 8.4: renderizado de la culata, sobre eje y pistón.

8.3. Aspa y cono



FIGURA 8.5: renderizado del cono y el aspa.

8.4. Cigüeñal 1 y 2

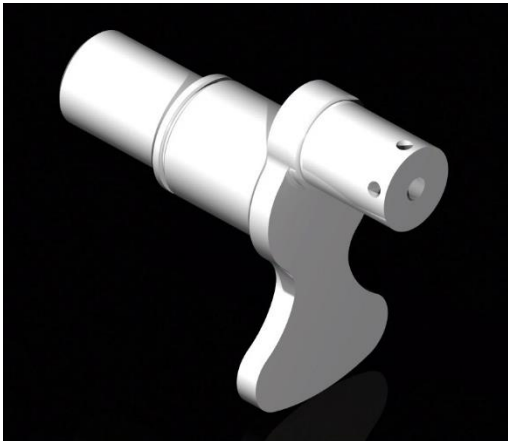


FIGURA 8.6: renderizado de los cigüeñales del motor.

8.5. Engranajes 1-2-3



FIGURA 8.7: engranajes 1, 2 y 3 renderizados.

8.6. Engranaje 4 y plato de levas

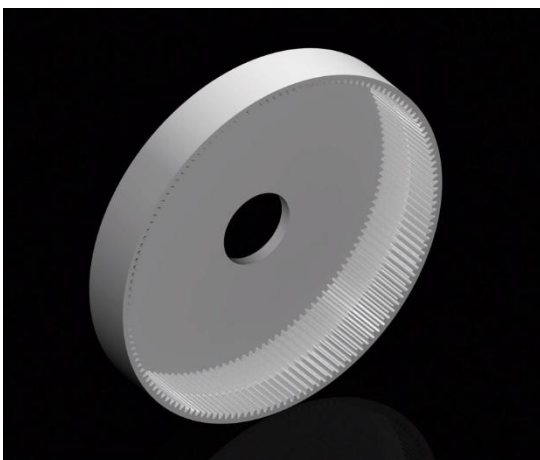


FIGURA 8.8: renderizado del cuarto engranaje junto con el plato de levas.

8.7. Biela madre, biela y muelle

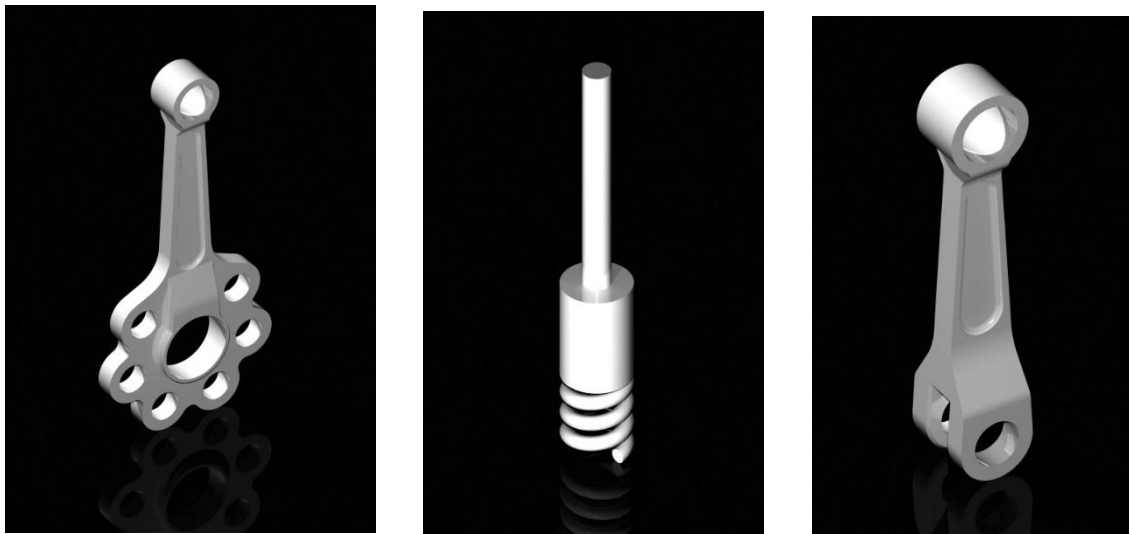


FIGURA 8.9: biela en estrella, biela y muelle renderizados.

8.8. Bulones y casquillo de unión



FIGURA 8.10: bulón biela-biela madre, bulón pistón-biela y casquillo de unión.

8.9. Varilla y alojador de varilla

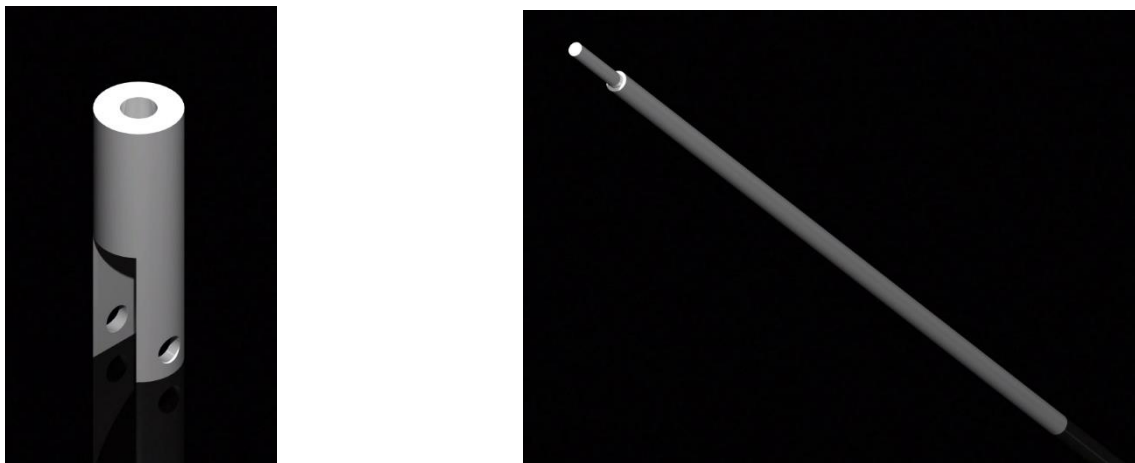


FIGURA 8.11: renderizado de alojador de varilla y varilla.

8.10. Palanca y soporte de palanca

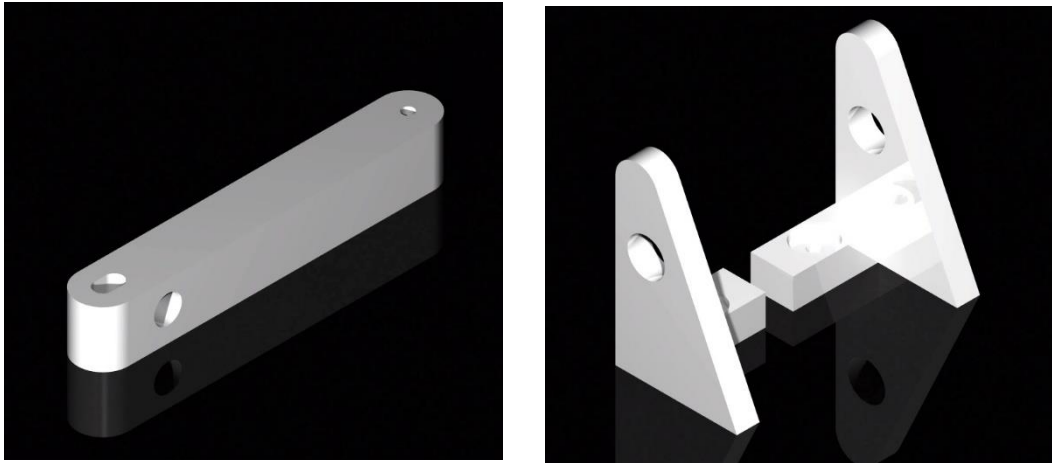


FIGURA 8.12: palanca y soporte de palanca renderizados.

8.11. Válvulas y rodillo seguidor

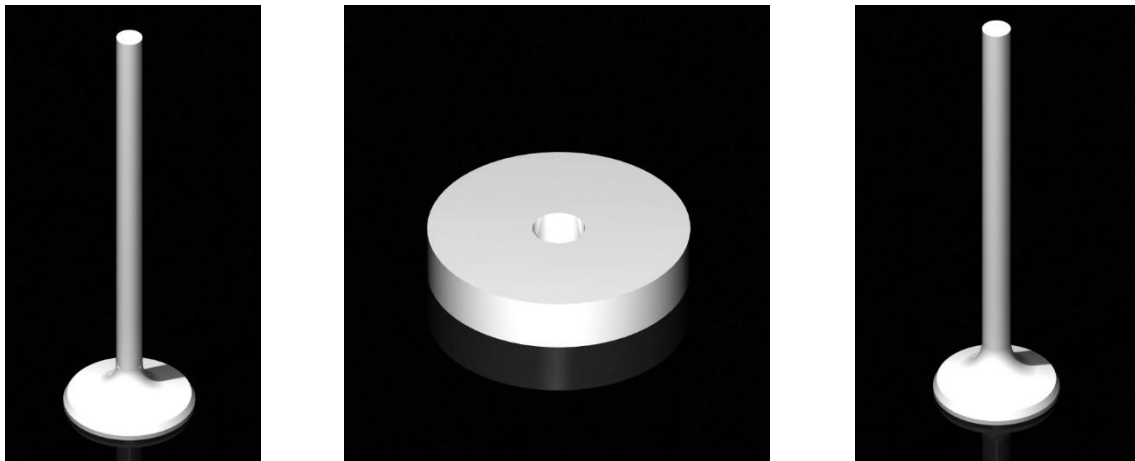


FIGURA 8.13: renderizado de válvulas de admisión y escape junto con el rodillo seguidor.

8.12. Segmentos

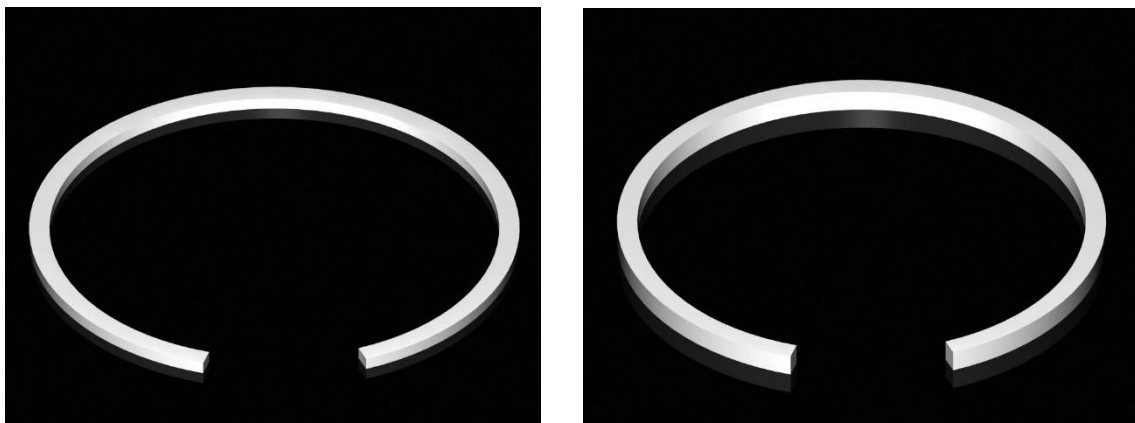


FIGURA 8.14: segmento de estanqueidad y segmento rascador renderizados.

8.13. Manivela de movimiento

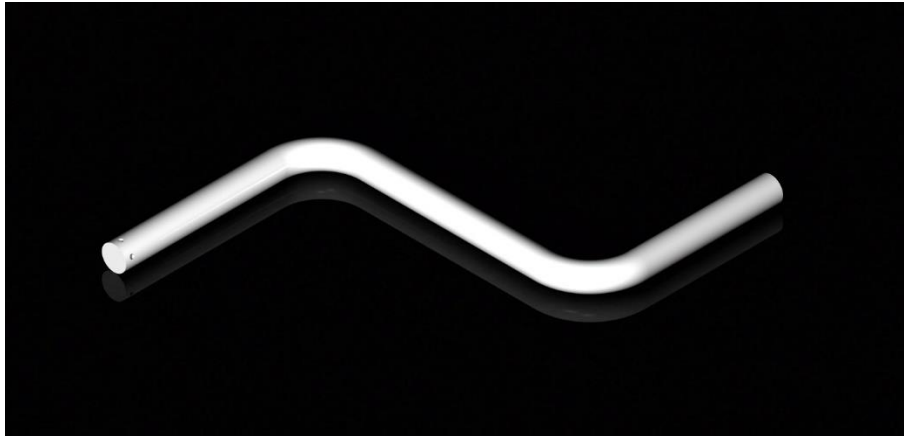


FIGURA 8.15: manivela de movimiento renderizada.

8.14. Subconjunto cono-aspas

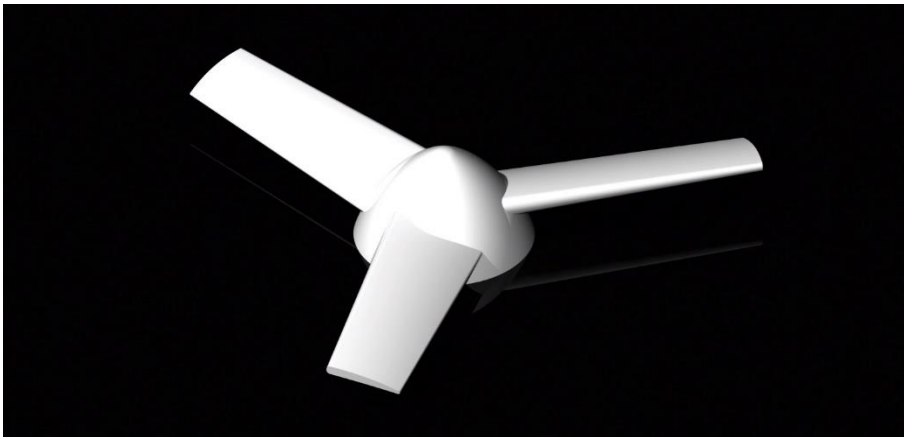


FIGURA 8.16: renderizado del subconjunto cono-aspas.

8.15. Subconjunto cilindro-palancas

Aquí se puede observar como el material de la tornillería es distinto al del resto de las piezas buscando que destaquen y se diferencien.



FIGURA 8.17: subconjunto cilindro-palancas renderizado.

8.16. Sistema de engranajes



FIGURA 8.18: sistema de engranajes renderizado.

8.17. Motor radial completo

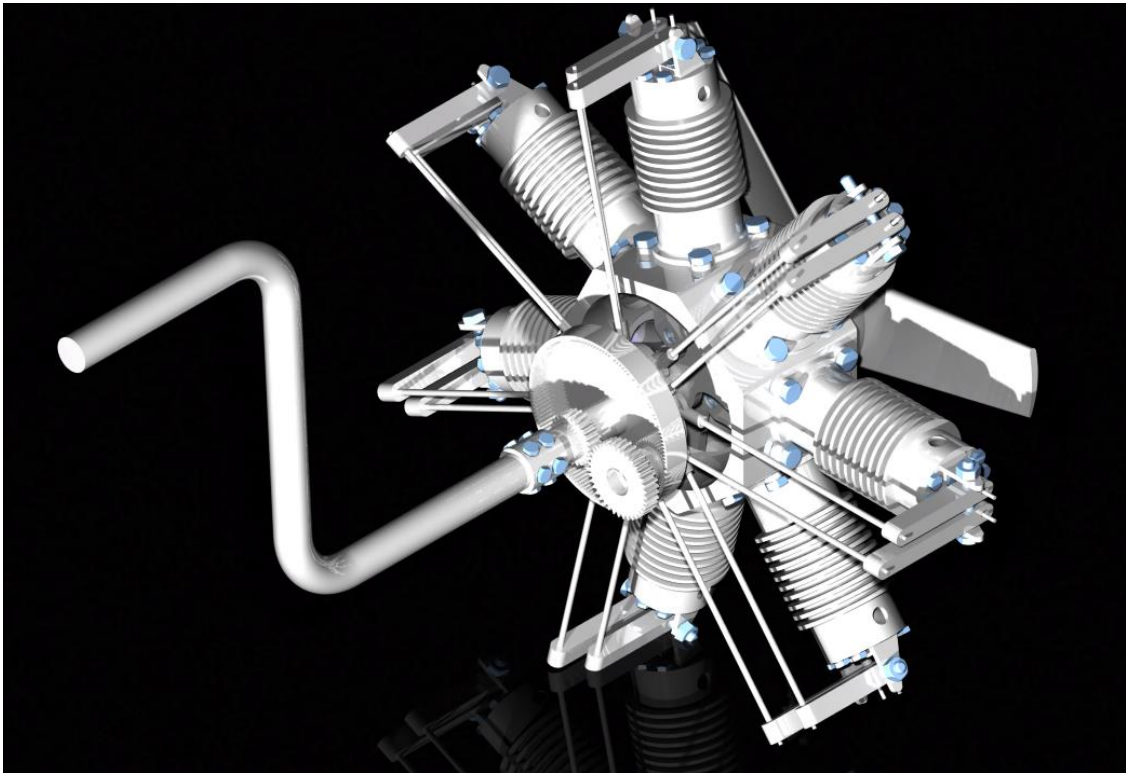


FIGURA 8.19: renderizado final de todo el conjunto del motor radial.

9. IMPRESIÓN 3D

La fabricación aditiva consiste en la fabricación de piezas a partir de un modelo 3D, sin necesidad de moldes ni utillajes de ningún tipo, gracias a la adición de material por capas.

Algunas de las ventajas de esta tecnología pueden ser, la amplia gama de productos con cualquier forma geométrica que se pueden imprimir de manera rápida y sencilla gracias a los modelos *CAD*, además, esta tecnología ofrece la posibilidad de aplicar cambios sobre la figura inicial, siendo así una tecnología muy fácil de adaptar al cambiante mercado.

La fabricación aditiva tiene una gran utilidad en la actualidad en los sectores de medicina (fabricación de implantes, moldes bucodentales, prótesis o planificación médica mediante modelos), moldes y matrices (fabricación de piezas con canales de refrigeración internos), aeronáutica y automoción (fabricación de piezas adaptables y muy ligeras en comparación con los materiales usados en la actualidad), arquitectura y topografía (fabricación de maquetas). (43)

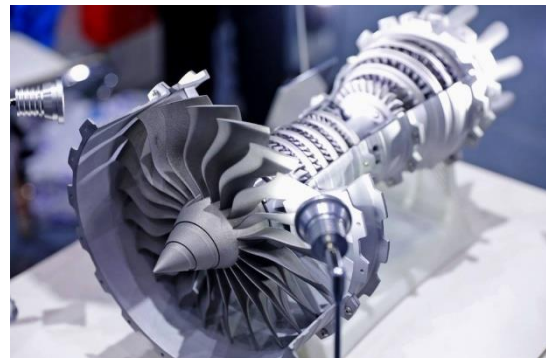


FIGURA 9.2: a la izquierda: aplicación de la impresión 3D en el sector de la medicina (59). A la derecha: aplicación de la impresión 3D en el sector industrial como prototipado. (60)

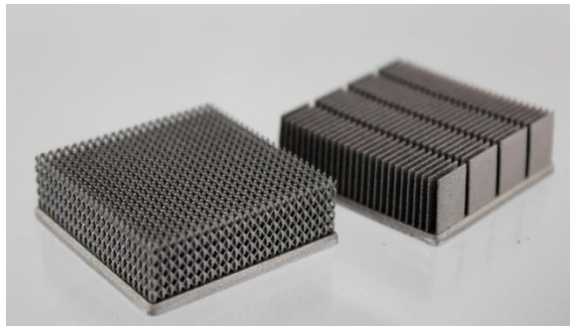


FIGURA 9.1: a la izquierda: aplicación de la impresión 3D en el sector bucodental (61). A la derecha: elementos conductores del sector de la electrónica impresos en 3D. (62)

Aunque el mundo de la impresión 3D sea muy amplio y tenga multitud de aplicaciones, en este proyecto se ha realizado una impresión enfocada en el prototipado de modelos que es la impresión de piezas a escala para dar una visión de lo que podría resultar el producto en su fabricación.

Se imprimirán cinco piezas: cuerpo, pistón, biela madre, bulón pistón-biela y el sobre eje. Se encajarán el pistón, el sobre eje, la biela madre y el bulón para ver tolerancias, juego diametral y resultado del ensamblaje.

9.1. Características técnicas de la impresora

La impresora utilizada en este proyecto pertenece a Raúl Gil Ginés, alumno de la *Escuela Politécnica Superior de Linares*, impresora que presentará en su *Trabajo de Fin de Grado*. Por lo tanto, tanto la impresora como el software han ido sufriendo cambios y reajustes hasta conseguir el resultado deseado.

Se trata de una impresora 3D de modelo por deposición fundida tipo *Core XY*. La impresora funciona de manera que el extrusor se mueve en el eje x e y (plano horizontal) y la cama se desplaza en el eje Z, está compuesta por perfiliería de aluminio y piezas de impresión 3D de *PLA*.

En temas de impresión, las piezas que se pueden imprimir pueden ser de *PLA*, *ABS*, *PETG* y el tamaño de la cama es de 300x600x300 con lo que se pueden hacer piezas de gran tamaño. La calidad de las piezas va a depender mayormente de la boquilla que se utilice y los parámetros de configuración.

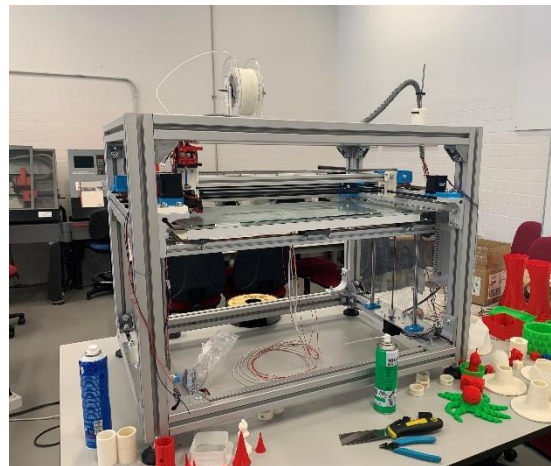
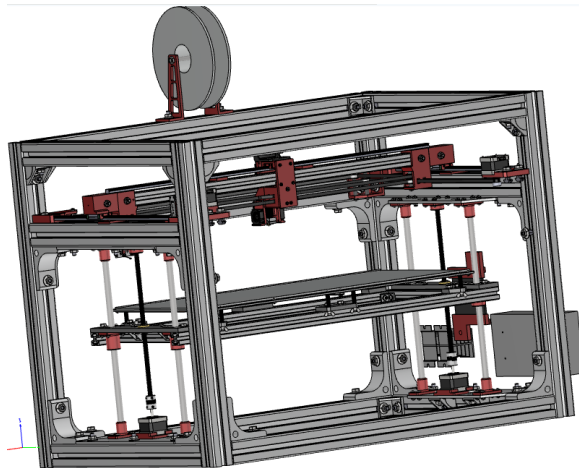


FIGURA 9.3: modelo 3D e imagen real de la impresora utilizada.

Los materiales utilizados fueron: *PETG* a 230-240°C, *PLA* a 210°C, *ABS* entre 235-245°C. El relleno de piezas fue de 20% con tipo rejilla y las alturas de capa fueron de 0.4 mm para las piezas en *PETG* y *ABS* y 0.2 mm para las de *PLA*. No se utilizaron estructuras de soporte.



FIGURA 9.4: filamento PETG de color negro con el que se construyó el pistón.



FIGURA 9.5: a la izquierda una bobina de ABS de color blanco con la que se hizo el cuerpo del motor. A la derecha PLA bobina que se utilizó para imprimir la biela y el bulón.

9.2. Proceso de impresión

Tras el modelado, el primer paso es obtener el archivo de la pieza o piezas en formato 'stl' (Standard Triangulation Language), una representación de la pieza triangulada cuya calidad aumentará o disminuirá en función del tamaño de los triángulos.

Una vez se obtiene el modelo en ese formato, se utiliza un software específico para colocar la pieza en la 'cama' de la impresora, configurar y ajustar los parámetros de impresión según las necesidades del usuario. Al tener todo colocado y configurado se empieza a imprimir capa a capa hasta conseguir el resultado final.

En este caso se ha utilizado un software propio de D. Pedro Aguilar, docente del departamento de Telecomunicaciones de la *Escuela Politécnica Superior de Linares*, en el cual se configuran los parámetros de impresión de las piezas y se manda esta información a la impresora.

Uno de los problemas que ocurrieron mediante la impresión fue que la máquina aún no tenía instalado el sistema de cama caliente para mejorar la adherencia de las piezas a la superficie de la cama, por lo que únicamente se utilizó laca comercial. Por este motivo se despegó una de las piezas y provocó un bloqueo en los movimientos de avance del extrusor; en ese momento no había nadie presente y se quemaron algunos componentes de la placa electrónica principal.

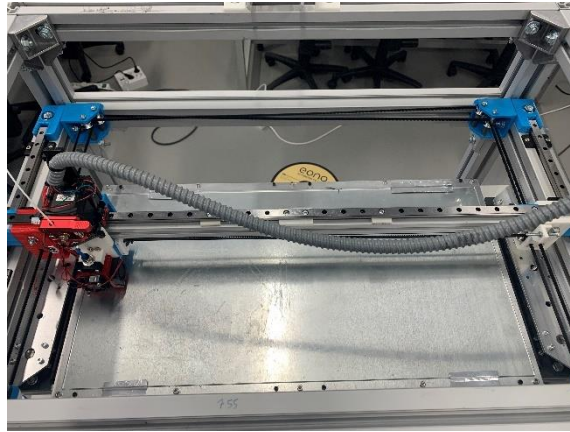


FIGURA 9.6: en la parte inferior de la imagen aparece la cama de la impresora algo rayada y dañada.

En la pieza del cuerpo (pieza hexagonal) se observan imperfecciones en la superficie interior de la base, el motivo principal fue una velocidad excesiva del avance, lo cual, tal como se ha comentado antes, se corrigió durante la impresión y ésta pudo continuar con mejor acabado superficial. A continuación se muestra el resultado final de las piezas ya ensambladas.

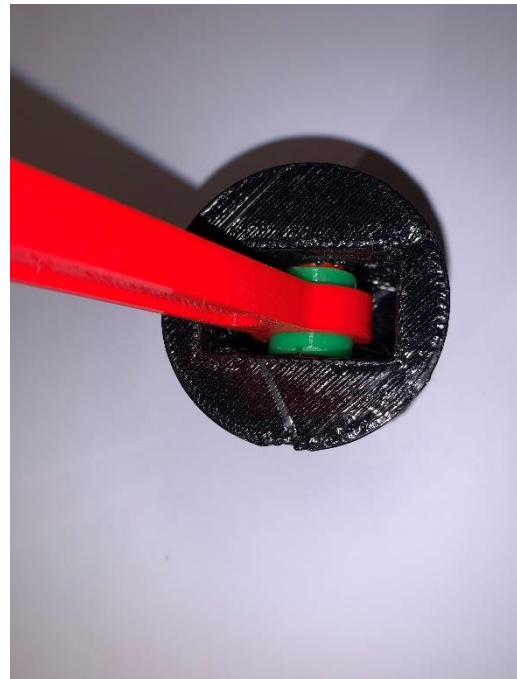


FIGURA 9.7: a la izquierda el ensamblaje de todas las piezas impresas. A la derecha el interior del pistón donde se ve el ajuste entre la biela madre, el sobre eje y el bulón de pistón.



FIGURA 9.8: en esta figura se aprecia el cuerpo del motor, y se observan las imperfecciones comentadas anteriormente.

10. CONCLUSIONES Y FUTURAS MEJORAS

En este proyecto tiene como principal aprendizaje, el manejo del software, *CATIA*, se ha obtenido bastante soltura en el diseño *2D* y *3D* lo que suma una experiencia que resulta muy útil en el día a día de un ingeniero mecánico. El manejo de varios módulos y el descubrimiento de algunos de ellos hace que se haya descubierto en el programa una baza que explotar en mi futuro para el mundo laboral.

Además de aprender a diseñar en el programa, se ha aprendido metodología real que se usa en las empresas que trabajan con este software, la incorporación de tornillería de catálogo, ajustada a las diferentes normativas como *ISO* o *DIN*. Se ha descubierto la cantidad de tipos de elementos de unión y métricas que están normalizadas además de utensilios como los circlips que son tan usados y yo no había oído hablar de ellos.

Se han podido aplicar los conocimientos de motores que se aprenden en las asignaturas del departamento de '*Máquinas y Motores térmicos*'. Sin embargo, se ha tenido que aprender el funcionamiento y la historia de los motores de avión y en concreto de los motores radiales.

Sin duda el mayor aprendizaje fuera de todo lo impartido en el grado de ingeniería mecánica ha sido la impresión *3D*, un sector que, particularmente, me interesa bastante ya que me parece de lo más útil y aplicable. Se ha tenido que aprender desde cero a usar software de impresión *3D* y manejo con las impresoras. Un factor añadido a este proyecto es la colaboración con un compañero al nutrirnos mutuamente de nuestros proyectos, Raúl Gil puede aprender más de su impresora gracias a la impresión de mis piezas y yo he podido aprender su proyecto al ser la primera vez que manejaba una impresora *3D*, su metodología de impresión y el ajuste de los parámetros para conseguir unos acabados perfectos.

Como ya se ha comentado anteriormente, el proyecto se ajusta al diseño *3D* apartando asuntos ingenieriles muy importantes. Una de las mejoras que puede tener el proyecto es el cálculo con *CFD* o software de simulación de flujos, quizá una de las ramas más importantes a tratar a la hora de diseñar cualquier motor. Para ello probablemente se podrían aplicar los conocimientos aprendidos en la asignatura de '*Simulación de Flujos Industriales*' en el que trabajamos con *ANSYS Fluent*.

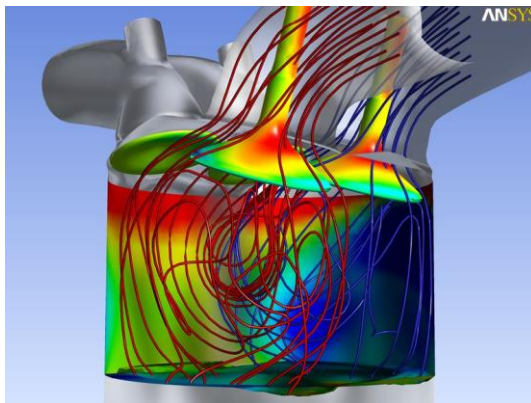


FIGURA 10.1: simulación de flujos en la cámara de combustión mostrando los vectores seguidos por el aire.
(44)

Otro punto a tratar y que se ha ido comentando durante la memoria del proyecto ha sido el cálculo estructural de algunas piezas del motor. Tratándose de un motor de combustión interna algunas piezas deberían soportar bastante fuerza, algo a tener muy en cuenta a la hora de diseñar el motor. Para abordar este campo se podría aplicar la técnica de los elementos finitos impartida en varias asignaturas del departamento de '*Medios Continuos y Teoría de Estructuras*'. El software a utilizar podría ser *CATIA* que incorpora módulos de cálculo, pero se podría seguir usando *ANSYS* ya que es posiblemente el software más potente del mercado en simulación y cálculo.

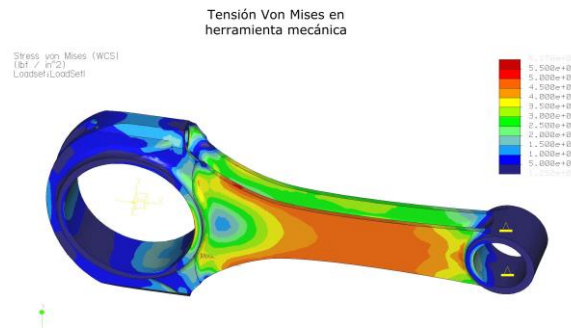


FIGURA 10.2: método de elementos finitos aplicado a la biela de un motor (45).

Además, *CATIA* incorpora como ya se ha comentado una tecnología de fabricación de piezas, que se podría usar para fabricar alguna pieza usando alguna máquina industrial e intercambiarla por alguna pieza 3D y estudiar los cambios que se producen y que el proyecto adopte una utilidad real para cualquier fin docente de la *Escuela Politécnica Superior de Linares*.

11. Referencias

1. Planos con Ciri. [En línea] [Citado el: 17 de 07 de 2022.] <http://planosconciri.blogspot.com/2010/07/motor-de-estrella.html..>
2. Automotriz.mobi. [En línea] [Citado el: 17 de 07 de 2022.] <http://www.automotriz.mobi/coches/cars-trucks-autos/other-autos/115875.html..>
3. Noticias.coches.com. [En línea] [Citado el: 17 de 07 de 2022.] <https://noticias.coches.com/consejos/tipos-motores-distribucion-de-cilindros/273610>.
4. Motor pasion. [En línea] [Citado el: 17 de 07 de 2022.] <https://www.motorpasion.com/mazda/el-primer-modelo-con-motor-rotativo-de-mazda-cumple-50-anos-repasamos-su-historia>.
5. Aviation Group. [En línea] [Citado el: 17 de 07 de 2022.] <https://www.aviationgroup.es/actualidad/el-primer-vuelo-de-los-hermanos-wright-pioneros-en-aviacion/>.
6. Profefeito. [En línea] [Citado el: 17 de 07 de 2022.] <http://profefeito.blogspot.com/2016/03/el-primer-motor-del-flyer-de-los.html>.
7. Como funciona. [En línea] [Citado el: 17 de 07 de 2022.] <https://comofunciona.co/un-motor-radial-o-de-estrella/>.
8. Motor pasion. [En línea] [Citado el: 18 de 07 de 2022.] <https://www.motorpasion.com/bmw/la-historia-de-bmw-parte-1-la-era-de-la-aviacion>.
9. Diccionario Motorgiga. [En línea] [Citado el: 17 de 07 de 2022.] <https://diccionario.motorgiga.com/diccionario/v-cilindros-en-definicion-significado/gmx-niv15-con195860.htm#:~:text=El%20primer%20motor%20en%20V,remontan%20a%20principios%20de%20siglo..>
10. Hmong. [En línea] [Citado el: 18 de 07 de 2022.] <https://hmong.es/wiki/Turbojet>.
11. Motor service. [En línea] [Citado el: 24 de 07 de 2022.] <https://www.ms-motorservice.com.br/es/productos-catalogos/productos-los-componentes-del-motor-en-primer-plano/camisas-de-cilindro/camisas-de-cilindro/>.
12. Centrumtec. [En línea] [Citado el: 18 de 07 de 2022.] <https://centrumtec.com/producto/workshop-project-panthera-catia-v5/>.
13. Wikipedia. [En línea] [Citado el: 18 de 07 de 2022.] <https://es.wikipedia.org/wiki/CATIA>.
14. Digital School. [En línea] [Citado el: 18 de 07 de 2022.] <https://www.digitalschool.ca/cad-a-brief-history/>.
15. Timetoast. [En línea] [Citado el: 18 de 07 de 2022.] <https://www.timetoast.com/timelines/evolucion-del-cad>.

16. Wikipedia. [En línea] [Citado el: 18 de 07 de 2022.] https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_del_dise%C3%B1o_asistido_por_computadora.
17. FormaCAD. [En línea] [Citado el: 18 de 07 de 2022.] <https://formacad.es/historia-del-cad-y-sus-origenes/>.
18. Castor. [En línea] [Citado el: 18 de 07 de 2022.] <https://www.castor.es/historia-software-CAD-CAM.html>.
19. Wikipedia. [En línea] [Citado el: 18 de 07 de 2022.] https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_del_dise%C3%B1o_asistido_por_computadora.
20. EMITT. [En línea] [Citado el: 18 de 07 de 2022.] <http://www.emitt.es/blog/sabes-cuales-son-los-programas-de-dise%C3%B1o-3d-mas-usados-en-ingenieria#sthash.ejVek9sP.HYduweEL.dpbs>.
21. Libro Manual. [En línea] [Citado el: 18 de 07 de 2022.] <https://libromanual.com/aprender-catia-v5-con-ejercicios-alambricos-y-superficies/>.
22. Google Sites. [En línea] [Citado el: 18 de 07 de 2022.] <https://sites.google.com/site/queesunamaquinatermica/combustion-interna/4-1-el-motor-de-4-tiempos>.
23. Gdocu upv. [En línea] [Citado el: 18 de 07 de 2022.] https://gdocu.upv.es/alfresco/service/api/node/content/workspace/SpacesStore/130ad267-fe67-4ec7-8363-51b16ffe11a6/TOC_0809_04_01.pdf?guest=true.
24. Gctbooks. [En línea] [Citado el: 24 de 07 de 2022.] <https://gctbooks.files.wordpress.com/2016/02/internal-combustion-engine-fundamentals-by-j-b-heywood.pdf>.
25. Google Sites. [En línea] [Citado el: 12 de 08 de 2022.] <https://sites.google.com/a/ieselcano.es/motores/componentes-motor-ci/cilindro/cilindro>.
26. Prueba de ruta. [En línea] [Citado el: 18 de 07 de 2022.] <https://www.pruebaderuta.com/elementos-que-componen-el-motor.php>.
27. Actualidad motor. [En línea] [Citado el: 12 de 08 de 2022.] <https://www.actualidadmotor.com/la-culata-elemento-esencial/>.
28. Wikiwand. [En línea] [Citado el: 24 de 07 de 2022.] https://www.wikiwand.com/es/Motor_DOHC.
29. Hangarone. [En línea] [Citado el: 24 de 07 de 2022.] <https://www.hangarone.co.nz/search/os-number-8-glow-plug?gn=Search&gp=2>.
30. Wikipedia. [En línea] [Citado el: 12 de 08 de 2022.] https://es.wikipedia.org/wiki/Bloque_del_motor#:~:text=Los%20materiales%20m%C3%A1s%20usados%20son,pero%20de%20precio%20m%C3%A1s%20elevado..
31. Orpi-sl. [En línea] [Citado el: 24 de 07 de 2022.] <https://www.orpi-sl.com/productos/casosdeexito/golmatic/fabricacionmotorradiar9cilindros>.

32. Uaeh. [En línea] [Citado el: 12 de 08 de 2022.] <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/sahagun/n3/e1.html#:~:text=Un%20pist%C3%B3n%20se%20compone%20de,hierro%2C%20y%20aluminio%2Dsilicio..>
33. Mundo del motor. [En línea] [Citado el: 24 de 07 de 2022.] <https://www.mundodelmotor.net/pistones-de-motor/>.
34. Motor pasión moto. [En línea] [Citado el: 12 de 08 de 2022.] <https://www.motorpasionmoto.com/industria/pistones-sin-segmentos-en-motores-del-futuro#:~:text=Segmentos%20hay%20de%20varios%20tipos,el%20n%C3%ADquel%2C%20silicio%20o%20manganeso..>
35. Pinterest. [En línea] [Citado el: 31 de 08 de 2022.] <https://www.pinterest.es/pin/494903446524386357/>.
36. Sim Man. [En línea] [Citado el: 31 de 08 de 2022.] <https://www.sim-man.com/servicios-de-simulacion/analisis-de-elemento-finito>.
37. Youtube. [En línea] [Citado el: 17 de 07 de 2022.] <https://www.youtube.com/watch?v=-xlueSQjtLE>.
38. Wikipedia. [En línea] [Citado el: 17 de 07 de 2022.] https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_rotativo.
39. 3D Warehouse. [En línea] [Citado el: 17 de 07 de 2022.] <https://3dwarehouse.sketchup.com/model/15deafcd5b4a5ede98b8c800ae001b66/Pratt-Whitney-R-1340-Wasp>.
40. Zweiterweltkrieg. [En línea] [Citado el: 17 de 07 de 2022.] <https://www.zweiterweltkrieg.org/phpBB2/viewtopic.php?f=34&t=9481>.
41. Niixer. [En línea] [Citado el: 18 de 07 de 2022.] [https://niixer.com/index.php/2021/08/13/software-pionero-en-3d-sketchpad/#:~:text=Sketchpad%20fue%20el%20primer%20software,asistido%20por%20ordenador%20\(CAD\)..](https://niixer.com/index.php/2021/08/13/software-pionero-en-3d-sketchpad/#:~:text=Sketchpad%20fue%20el%20primer%20software,asistido%20por%20ordenador%20(CAD)..)
42. 1000 Marcas. [En línea] [Citado el: 18 de 07 de 2022.] <https://1000marcas.net/autocad-logo/>.
43. XPLAN. [En línea] [Citado el: 18 de 07 de 2022.] <https://www.x-plan.com/soporte-y-descargas/solid-edge-logo/>.
44. Decideon. [En línea] [Citado el: 18 de 07 de 2022.] <https://decideon.es/especialidades/estructuras-navales/herramientas/cenifer-logo-catia/>.
45. 1000 Marcas. [En línea] [Citado el: 18 de 07 de 2022.] <https://1000marcas.net/solidworks-logo/>.
46. Aero space engines. [En línea] [Citado el: 24 de 07 de 2022.] <http://aerospaceengines.blogspot.com/2013/02/un-tema-sorprendente-en-los-motores.html>.
47. E-struc. [En línea] [Citado el: 24 de 07 de 2022.] <https://e-struc.com/2020/04/21/perfiles-estructurales-de-acero-abiertos/>.

48. Como funciona. [En línea] [Citado el: 24 de 07 de 2022.] <https://comofunciona.co/el-ciguenal/>.
49. Ck clasificados. [En línea] [Citado el: 24 de 07 de 2022.] <http://www.ck.clasificados.com/ciguenal-motor-radial-400-h-p-nuevo-okm-132566.html>.
50. Auto y técnica. [En línea] [Citado el: 24 de 07 de 2022.] <https://autoytecnica.com/partes-del-sistema-de-distribucion-del-motor/>.
51. Wikipedia. [En línea] [Citado el: 24 de 07 de 2022.] https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_OHV.
52. Aero space engines. [En línea] [Citado el: 12 de 08 de 2022.] <http://aerospaceengines.blogspot.com/2013/04/el-plato-de-levas-de-un-radial.html>.
53. Diario motor. [En línea] [Citado el: 12 de 08 de 2022.] <https://www.diariomotor.com/que-es/mecanica/distribucion-variable/>.
54. Electrmecánica. [En línea] [Citado el: 12 de 08 de 2022.] <http://www1.frm.utn.edu.ar/electromecanica/materias%20pagina%20nuevas/elementoM aquina/material/libroCabecera.pdf>.
55. Pro dintec. [En línea] [Citado el: 12 de 08 de 2022.] <http://www.pro dintec.es/es/nuestra-actividad/fabricacion-avanzada/fabricacion-aditiva-impresion-3d>.
56. Frax3d. [En línea] [Citado el: 12 de 08 de 2022.] <https://www.frax3d.com/aplicaciones-impresion-3d>.
57. Am material. [En línea] [Citado el: 12 de 08 de 2022.] <https://am-material.com/es/industry-news/3d-printing-metal-powders-for-aerospace-applications/>.
58. Intech3d. [En línea] [Citado el: 12 de 08 de 2022.] <https://intech3d.es/2021/09/14/como-implementar-la-impresion-3d-en-el-sector-dental/>.
59. Inter empresas. [En línea] [Citado el: 12 de 08 de 2022.] <https://www.interempresas.net/Fabricacion-aditiva/Articulos/391283-Fabricacion-elementos-conductores-impresion-3D-aplicaciones-energia-revision-materiales.html>.
60. Motor. [En línea] [Citado el: 12 de 08 de 2022.] <https://www.motor.es/que-es/biela>.
61. Curiosfera. [En línea] [Citado el: 12 de 08 de 2022.] <https://curiosfera-ciencia.com/como-se-hacen-las-helices-de-los-aviones/#:~:text=Las%20piezas%20principales%20de%20una,tambi%C3%A9n%20est%C3%A1%20fabricado%20en%20aluminio..>
62. Uaeh. [En línea] [Citado el: 12 de 08 de 2022.] <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/sahagun/n7/a1.html#:~:text=Actualmente%2C%20los%20cig%C3%BCe%C3%B1ales%20se%20fabrican,por%20fundici%C3%B3n%20nodular%20o%20d%C3%BActil..>

63. Atracparts. [En línea] [Citado el: 12 de 08 de 2022.]
[https://www.atracparts.com/es/engine-valves.php#:~:text=Las%20v%C3%A1lvulas%20del%20motor%20de,alta%20temperatura%20y%20alta%20tensi%C3%B3n\)..](https://www.atracparts.com/es/engine-valves.php#:~:text=Las%20v%C3%A1lvulas%20del%20motor%20de,alta%20temperatura%20y%20alta%20tensi%C3%B3n)..)

64. Atracparts. [En línea] [Citado el: 31 de 08 de 2022.]
[https://www.atracparts.com/es/engine-valves.php#:~:text=Las%20v%C3%A1lvulas%20del%20motor%20de,alta%20temperatura%20y%20alta%20tensi%C3%B3n\)..](https://www.atracparts.com/es/engine-valves.php#:~:text=Las%20v%C3%A1lvulas%20del%20motor%20de,alta%20temperatura%20y%20alta%20tensi%C3%B3n)..)

12. ANEXOS

Anexo 1: Cálculos del sistema de engranajes

Anexo 2: Planos del motor radial

12.1. Anexo 1: Cálculos del sistema de engranajes

En este apartado se calcularán los parámetros necesarios para la construcción de los dientes de cada engranaje, así como la relación que debe haber entre las ruedas dentadas para que se cumpla esa reducción de velocidad calculada anteriormente.

12.1.1. Diseño del sistema de engranajes

Primeramente, se debe calcular el número de dientes que debe poseer cada rueda dentada en función de la relación de transmisión. Esta relación decía que el plato de levas debía ir seis veces más lento que el cigüeñal para que se pudiera producir esa sincronización tan precisa con las válvulas de admisión y escape.

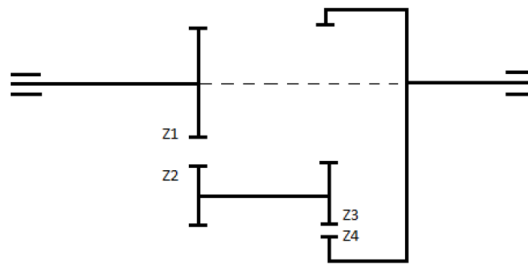


FIGURA 12.1: Esquema del sistema de engranajes utilizado en el motor, como se puede observar el engranaje Z1 y el Z4 están conectados entre sí mediante el cigüeñal.

$$\alpha = \frac{Z_1}{Z_2} \cdot \frac{Z_3}{Z_4} = \frac{24}{37} \cdot \frac{37}{144} = \frac{1}{6} \quad (10)$$

Por lo tanto, se obtiene que la rueda dentada 1 tendrá 24 dientes y un módulo de 1 valor normalizado según la norma UNE-18005 (1984). Se sabe que la rueda dentada 2 engrana con la rueda 1 por lo tanto deberán tener el mismo módulo, pero esta rueda posee 37 dientes.

La rueda dentada 3 tendrá 37 dientes y engranará con la rueda 4, por lo tanto, tendrán un módulo de 0,6. Además, como ya se ha comentado anteriormente, la rueda 2 va conectada a la 3 mediante un encaje justo y un tornillo que hará que giren solidariamente. Finalmente, la rueda dentada 4 tendrá 144 dientes y será una rueda donde el hueco entre diente y diente es el que debe tener la forma exacta para engranar con la rueda dentada 3.

12.1.2. Cálculo de los parámetros de los dientes de las ruedas

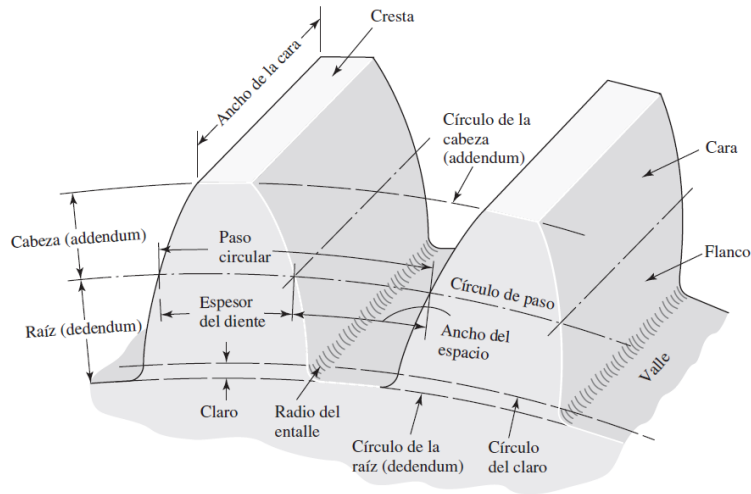


FIGURA 12.2: parámetros básicos para la construcción del diente del engranaje.

Se mostrarán las expresiones con las que se hallan los datos necesarios y posteriormente se resumirán todos los datos de las ruedas dentadas en una tabla. Para comenzar se calcular el radio de axoide que es una medida necesaria para el posterior cálculo del resto de parámetros, aun no siendo una medida real.

$$R_a = m \cdot \frac{Z}{2} \quad (11)$$

Siendo:

- m : módulo de la rueda dentada.
- Z : número de dientes de la rueda dentada.

El radio de base es una medida teórica de la cuál parte el dibujo de la envolvente del diente. El diente no empieza en este radio si no en el radio de pie, que suele ser un error frecuente.

$$R_b = R_a \cdot \cos(\alpha) \quad (12)$$

- α : ángulo de empuje.

El radio de pie es la parte interna de la envolvente, como ya se comentó anteriormente, es desde donde parte el diente y la expresión para calcular esta medida real es la siguiente:

$$R_p = R_a - m \quad (13)$$

Al partir el diente desde el radio de pie se generarían unos grandes concentradores de tensión y por lo tanto se le añade un radio de acuerdo lo que hace que el radio de fondo sea la medida real inferior del diente.

$$R_f = R_a + 1,25 \cdot m \quad (14)$$

En cuanto a la parte superior del diente se observa el radio de cabeza que es la medida real del radio superior del diente.

$$R_c = R_a + m \quad (15)$$

El espesor base se puede expresar tanto en milímetros como en grados y es el espesor que tiene cada diente del engranaje a partir de la circunferencia base.

$$e_b(mm) = \frac{\pi \cdot m}{2} \cdot \cos(\alpha) + 2 \cdot R_b \cdot tg(\alpha) - \alpha \quad (16)$$

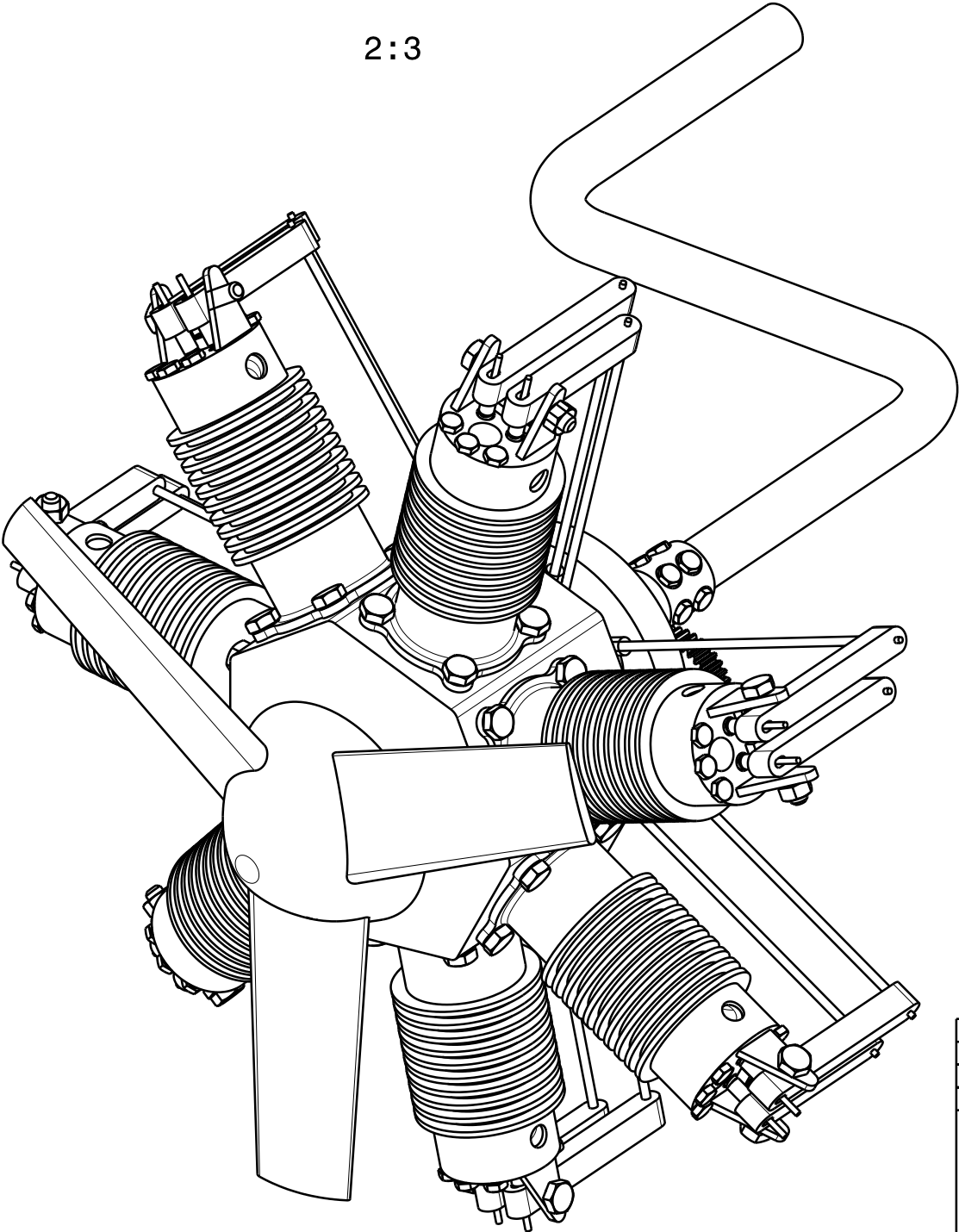
$$e_b(^{\circ}) = \frac{e_b(mm)}{R_b} \cdot \frac{180}{\pi} \quad (17)$$

12.2. Anexo 2: Planos del motor radial

Los planos se realizan con el módulo Drafting que incorpora CATIA, primero se realizaron los planos de las piezas y una vez ensamblados todos los conjuntos se realizaron las vistas explosionadas, lista de materiales y globos correspondientes.

Las vistas explosionadas se realizan mediante la creación de escenas en el entorno de diseño de CATIA, en esa escena se realiza la explosión y al pasar esa vista explosionada al módulo de Drafting, el resto de vistas no se modifican, esa es una de las grandes virtudes que tiene trabajar con escenas.

2:3



Bill of Material: Product1

Quantity	Part Number	Type	Number
1	CUERPO	Part	1
1	CIGUEÑAL	Part	2
1	ASPA Y HÉLICE	Assembly	
1	CIGUEÑAL2	Part	3
6	CILINDRO Y PALANCAS	Assembly	
1	SISTEMA DE ENGRANAJES	Assembly	
1	CILINDRO Y PALANCAS CON BIELA MADRE	Assembly	
1	PLATO DE LEVAS	Part	4
1	PALANCA_MOVIMIENTO	Part	5
1	CASQUILLO_UNION	Part	6
10	ISO 4017 SCREW M4x8 STEEL GRADE A HEXAGON HEAD	Part	7

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO	8/07	RAÚL S.			
COMPROBADO					
ESCALA:	MOTOR RADIAL CONJUNTO DEL MOTOR RADIAL			Nº PLANO 1/31	
2:1				SUSTITUYE A:	
				SUSTITUIDO POR:	

Bill of Material: ASPA Y HÉLICE

Quantity	Part Number	Type	Number
3	ASPA	Part	8
1	HÉLICE	Part	9

Bill of Material: CILINDRO Y PALANCAS

Quantity	Part Number	Type	Number
1	CILINDRO	Part	10
1	CULATA	Part	11
1	PISTON	Part	12
1	BULON DE PISTON	Part	13
1	SOBREJE	Part	14
1	SOPORTE_PALANCA	Part	15
1	PALANCA 2	Part	16
1	PALANCA	Part	17
2	VARILLA	Part	18
2	ALOJADOR_VARILLA	Part	19
2	RODILLO	Part	20
1	VALVULA DE ADMISION	Part	21
2	MUELLE	Part	22

Bill of Material: CILINDRO Y PALANCAS

Quantity	Part Number	Type	Number
4	ISO 4017 SCREW M6x12 STEEL GRADE A HEXAGON HEAD	Part	24
6	ISO 4017 SCREW M4x35 STEEL GRADE A HEXAGON HEAD	Part	25
1	ISO 4017 SCREW M6x40 STEEL GRADE A HEXAGON HEAD	Part	26
2	ISO 4017 SCREW M3x8 STEEL GRADE A HEXAGON HEAD	Part	27
1	BIELA	Part	28
1	BULON DE BIELA	Part	29
2	ISO 4017 SCREW M2x10 STEEL GRADE A HEXAGON HEAD	Part	30
2	SEGMENTO DE ESTANQUEIDAD	Part	31
1	SEGMENTO RASCADOR	Part	32
2	ANSI B27.7M RING 3CM1_5 STEEL EXTERNAL RETAINING E RING	Part	33
2	ANSI B27.7M RING 3CM1_6 STEEL EXTERNAL RETAINING E RING	Part	34
1	ISO 4032 NUT M6 STEEL GRADE A WASHER FACED HEXAGON HEAD	Part	35

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	8/07	RAÚL S.		
COMPROBADO				
ESCALA:	MOTOR RADIAL			Nº PLANO
2:1	LISTAS DE MATERIALES			2/31
				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:

Bill of Material: CILINDRO Y PALANCAS CON BIELA MADRE

Quantity	Part Number	Type	Number
1	CILINDRO	Part	10
1	CULATA	Part	11
1	PISTON	Part	12
1	BULON DE PISTON	Part	13
1	SOBREJE	Part	14
1	SOPORTE_PALANCA	Part	15
1	PALANCA 2	Part	16
1	PALANCA	Part	17
2	VARILLA	Part	18
2	ALOJADOR_VARILLA	Part	19
2	RODILLO	Part	20
1	VALVULA DE ADMISION	Part	21
2	MUELLE	Part	22
1	VALVULA DE ESCAPE	Part	23
4	ISO 4017 SCREW M6x12 STEEL GRADE A HEXAGON HEAD	Part	24
6	ISO 4017 SCREW M4x35 STEEL GRADE A HEXAGON HEAD	Part	25
1	ISO 4017 SCREW M6x40 STEEL GRADE A HEXAGON HEAD	Part	26
2	ISO 4017 SCREW M3x8 STEEL GRADE A HEXAGON HEAD	Part	27
1	BIELA ESTRELLA	Part	42
2	ISO 4017 SCREW M2x10 STEEL GRADE A HEXAGON HEAD	Part	43
2	ANSI B27.7M RING 3CM1_6 STEEL EXTERNAL RETAINING E RING	Part	34
2	SEGMENTO DE ESTANQUEIDAD	Part	31
1	SEGMENTO RASCADOR	Part	32

Bill of Material: SISTEMA DE ENGRANAJES

Quantity	Part Number	Type	Number
1	ENGRANAJE_1	Part	36
1	ENGRANAJE_2	Part	37
1	ENGRANAJE_3	Part	38
1	ENGRANAJE_4	Part	39
1	ISO 4017 SCREW M3x10 STEEL GRADE A HEXAGON HEAD	Part	40

Bill of Material: SISTEMA DE ENGRANAJES

Quantity	Part Number	Type	Number
1	ISO 4032 NUT M3 STEEL GRADE A HEXAGON	Part	41

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	8/07	RAÚL S.		
COMPROBADO				
ESCALA:	MOTOR RADIAL LISTAS DE MATERIALES			Nº PLANO 3/31
2:1				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:

Recapitulation of: Product1

Different parts: 43

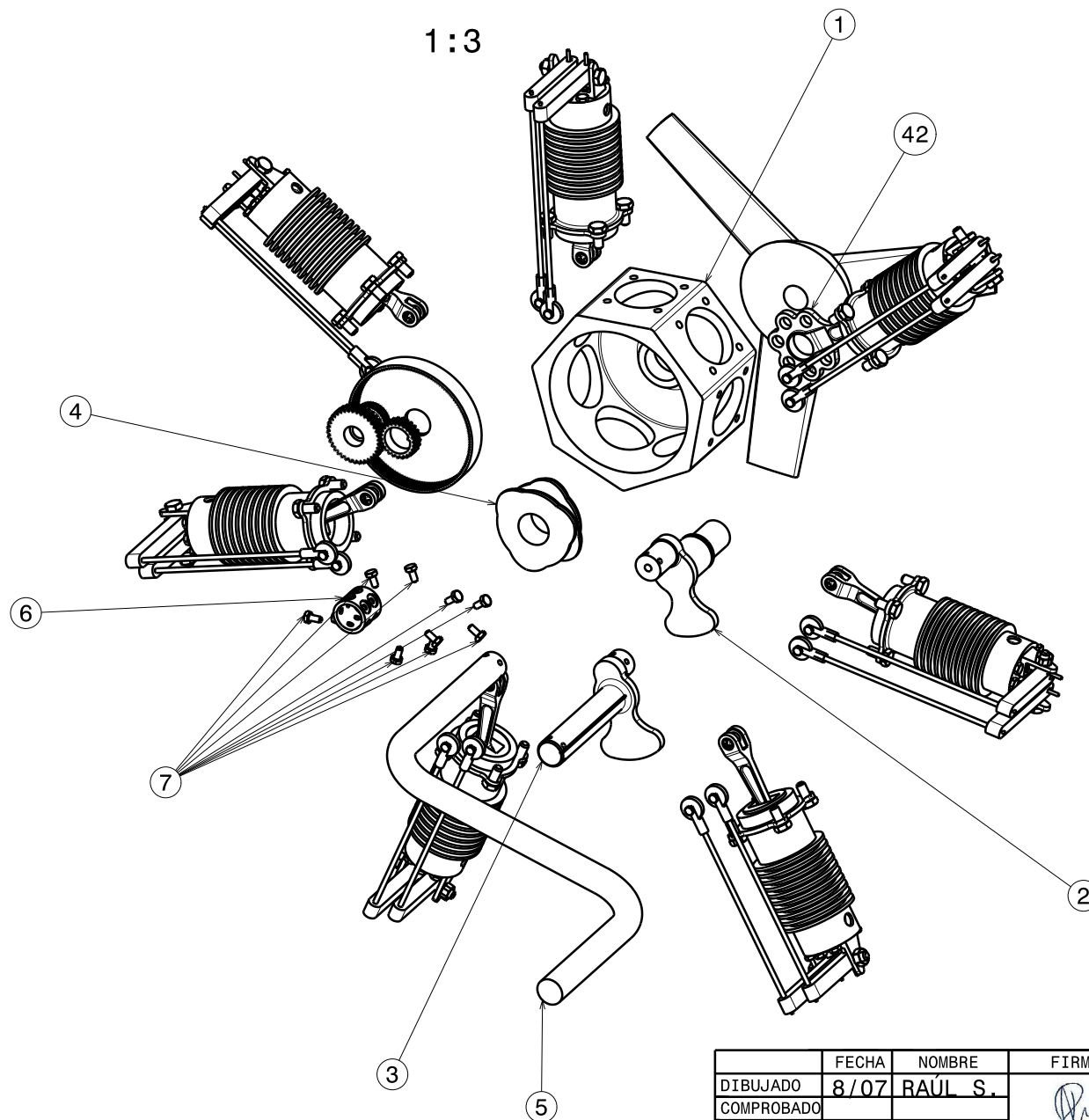
Total parts: 323

Quantity	Part Number	Number
1	CUERPO	1
1	CIGUEÑAL	2
3	ASPA	8
1	HÉLICE	9
1	CIGUEÑAL2	3
7	CILINDRO	10
7	CULATA	11
7	PISTON	12
7	BULON DE PISTON	13
7	SOBREJE	14
7	SOPORTE_PALANCA	15
7	PALANCA 2	16
7	PALANCA	17
14	VARILLA	18
14	ALOJADOR_VARILLA	19
14	RODILLO	20
7	VALVULA DE ADMISION	21
14	MUELLE	22
7	VALVULA DE ESCAPE	23
28	ISO 4017 SCREW M6x12 STEEL GRADE A HEXAGON HEAD	24
42	ISO 4017 SCREW M4x35 STEEL GRADE A HEXAGON HEAD	25
7	ISO 4017 SCREW M6x40 STEEL GRADE A HEXAGON HEAD	26
14	ISO 4017 SCREW M3x8 STEEL GRADE A HEXAGON HEAD	27
6	BIELA	28
6	BULON DE BIELA	29
12	ISO 4017 SCREW M2x10 STEEL GRADE A HEXAGON HEAD	30

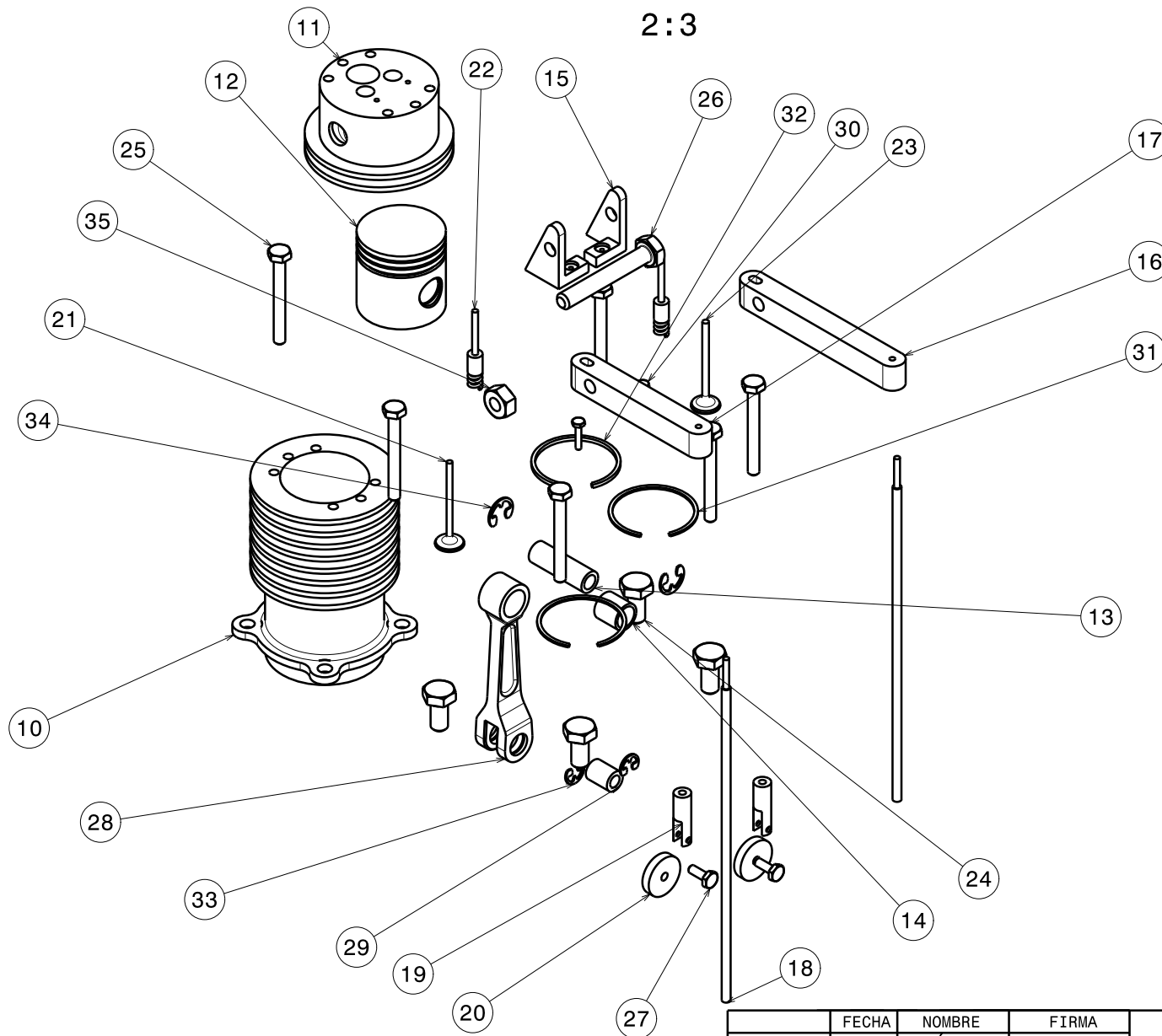
14	SEGMENTO DE ESTANQUEIDAD	31
7	SEGMENTO RASCADOR	32
12	ANSI B27.7M RING 3CM1_5 STEEL EXTERNAL RETAINING E RING	33
14	ANSI B27.7M RING 3CM1_6 STEEL EXTERNAL RETAINING E RING	34
6	ISO 4032 NUT M6 STEEL GRADE A WASHER FACED HEXAGON HEAD	35
1	ENGRANAJE_1	36
1	ENGRANAJE_2	37
1	ENGRANAJE_3	38

1	ENGRANAJE_4	39
1	ISO 4017 SCREW M3x10 STEEL GRADE A HEXAGON HEAD	40
1	ISO 4032 NUT M3 STEEL GRADE A HEXAGON	41
1	BIELA ESTRELLA	42
2	ISO 4017 SCREW M2x10 STEEL GRADE A HEXAGON HEAD	43
1	PLATO DE LEVAS	4
1	PALANCA MOVIMIENTO	5
1	CASQUILLO UNION	6
10	ISO 4017 SCREW M4x8 STEEL GRADE A HEXAGON HEAD	7

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	8/07	RAÚL S.		
COMPROBADO				
ESCALA:	MOTOR RADIAL			Nº PLANO
2:1	LISTAS DE MATERIALES			4/31
				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:

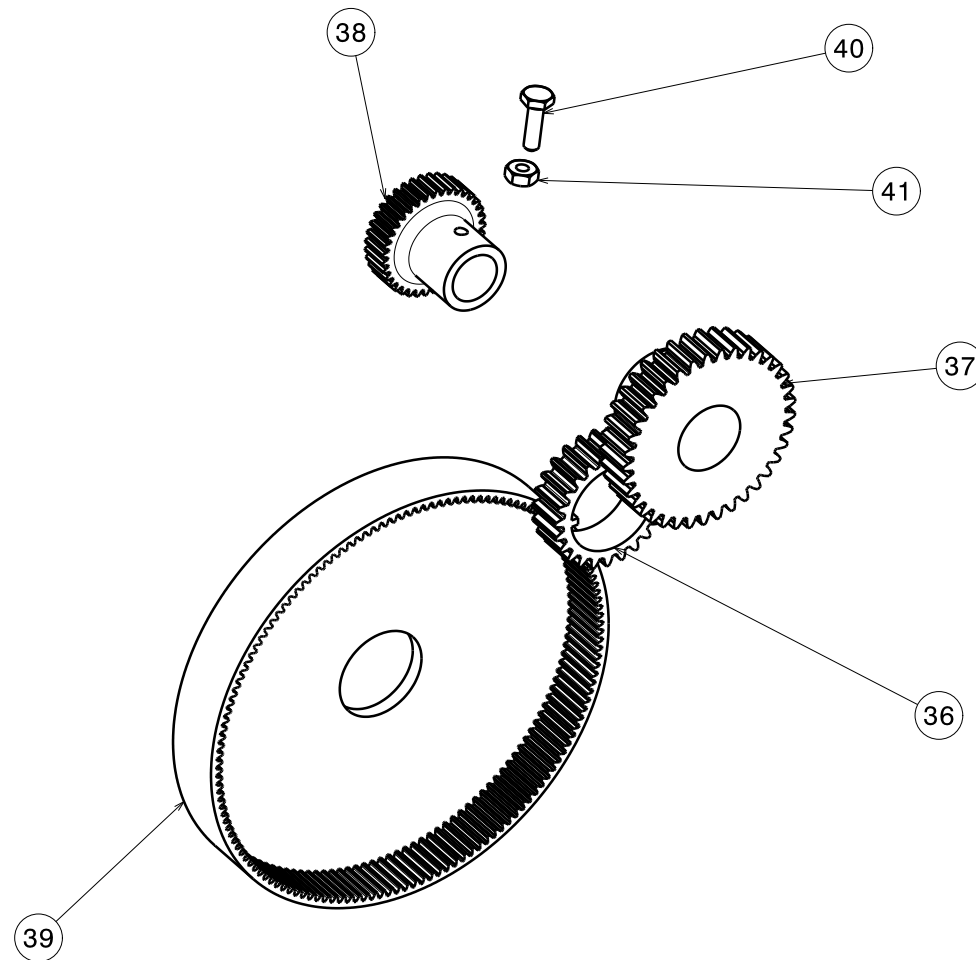


	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	8/07	RAÚL S.		
COMPROBADO				
ESCALA:	MOTOR RADIAL EXPLOSIONADO DEL CONJUNTO DEL MOTOR RADIAL			Nº PLANO
2:1				5/31
				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:

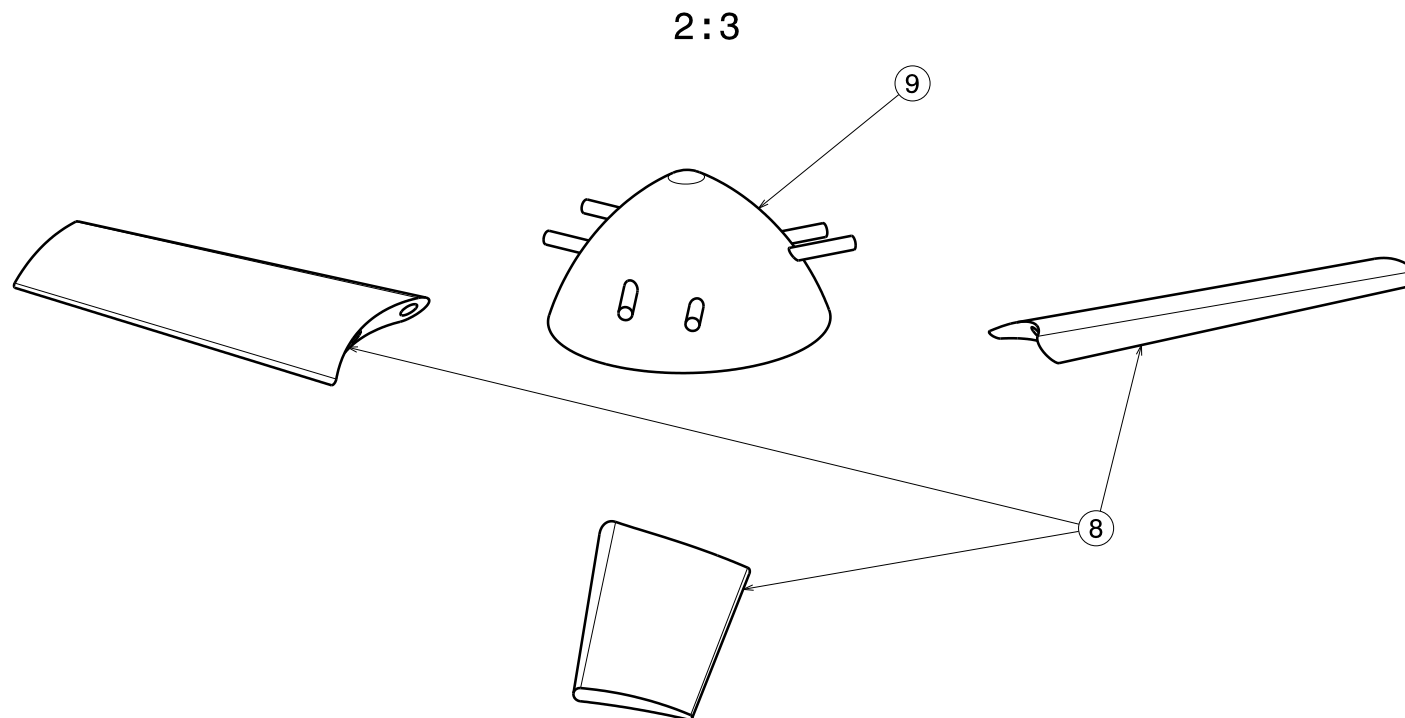


	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	8/07	RAÚL S.		
COMPROBADO				
ESCALA:	MOTOR RADIAL			Nº PLANO
2:1	EXPLOSIONADO DEL SUBCONJUNTO CILINDRO Y PALANCAS			6/31
				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:

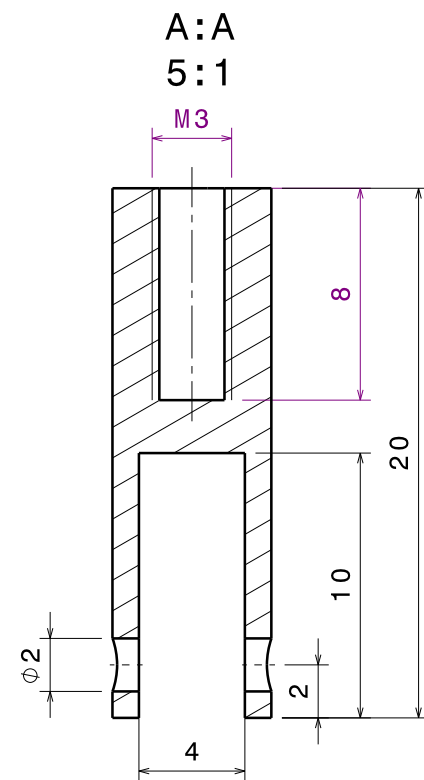
1:1



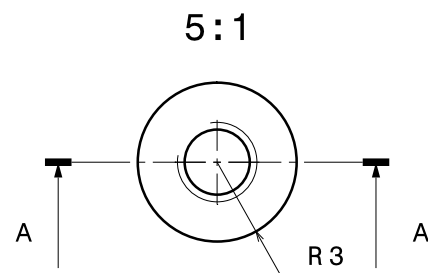
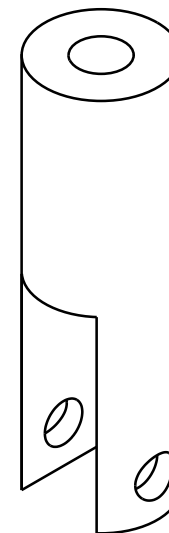
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	8/07	RAÚL S.		
COMPROBADO				
ESCALA:	MOTOR RADIAL EXPLOSIONADO DEL SUBCONJUNTO SISTEMA DE ENGRANAJES			Nº PLANO 7/31
2:1				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



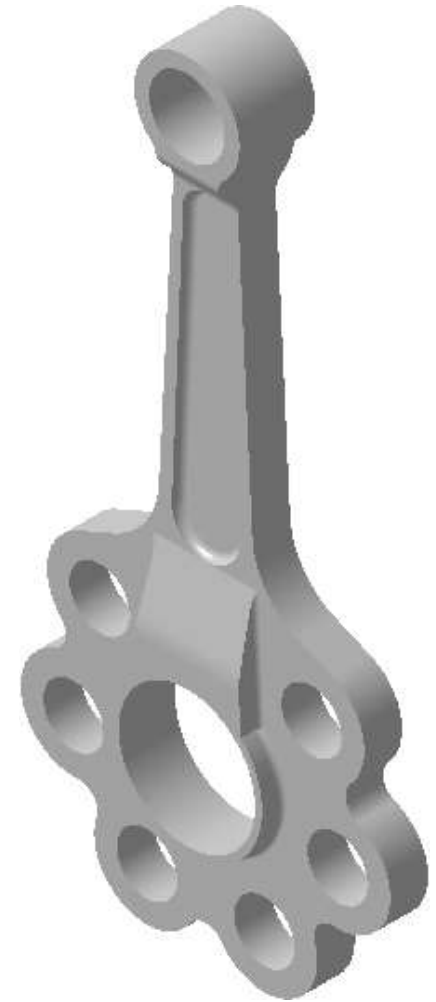
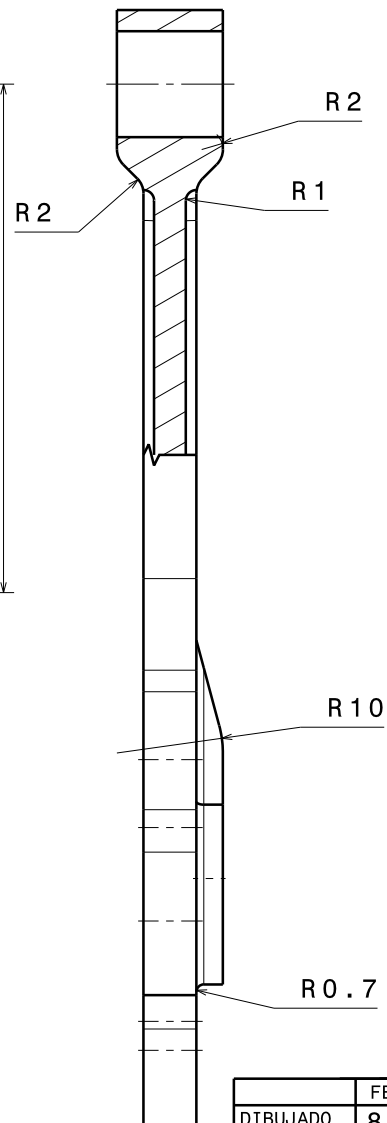
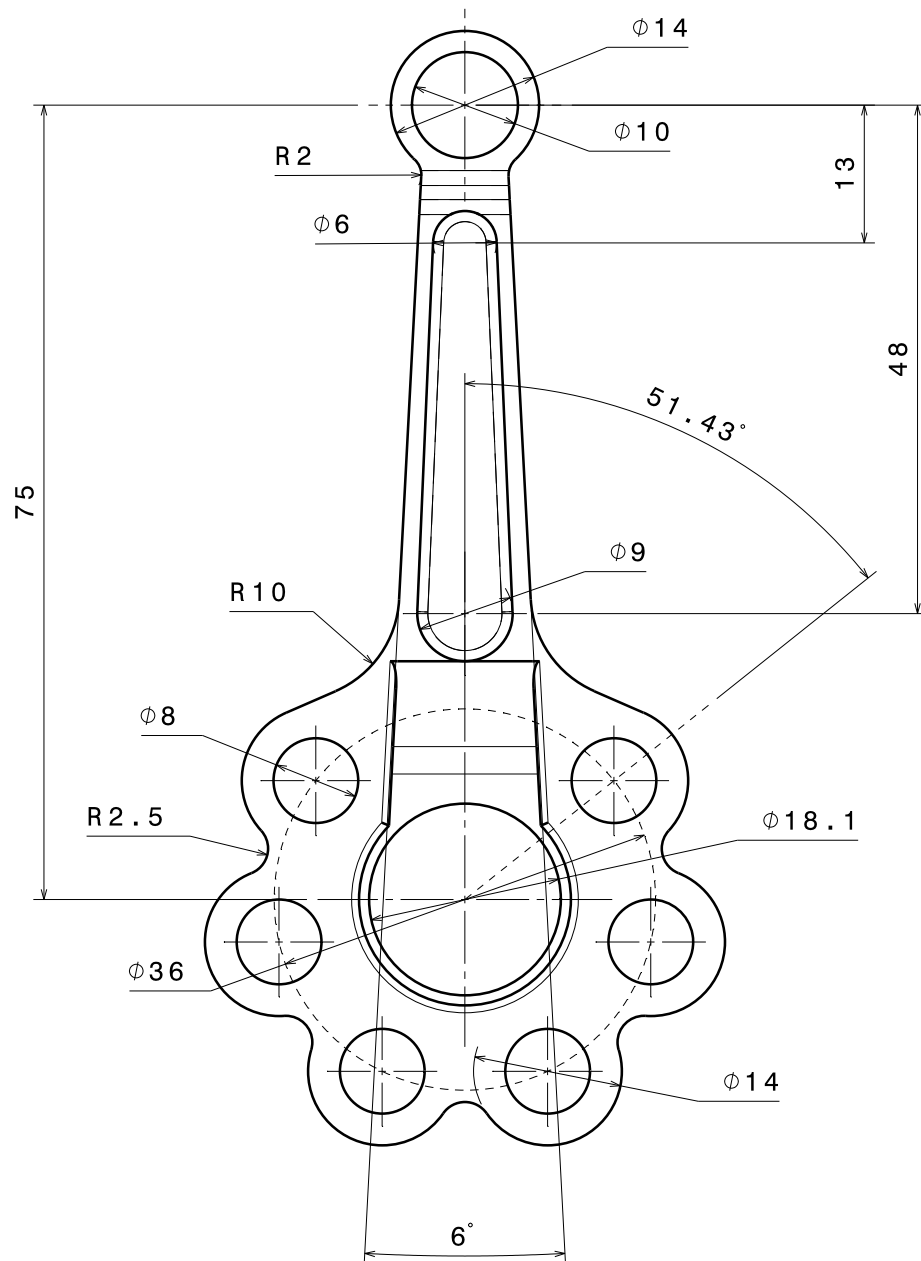
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	8/07	RAÚL S.		
COMPROBADO				
ESCALA:	MOTOR RADIAL EXPLOSIONADO DEL SUBCONJUNTO ASPA Y HÉLICE			Nº PLANO 8/31
2:1				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



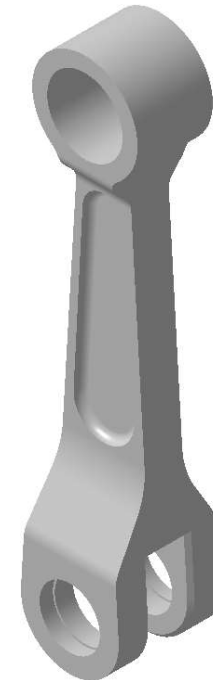
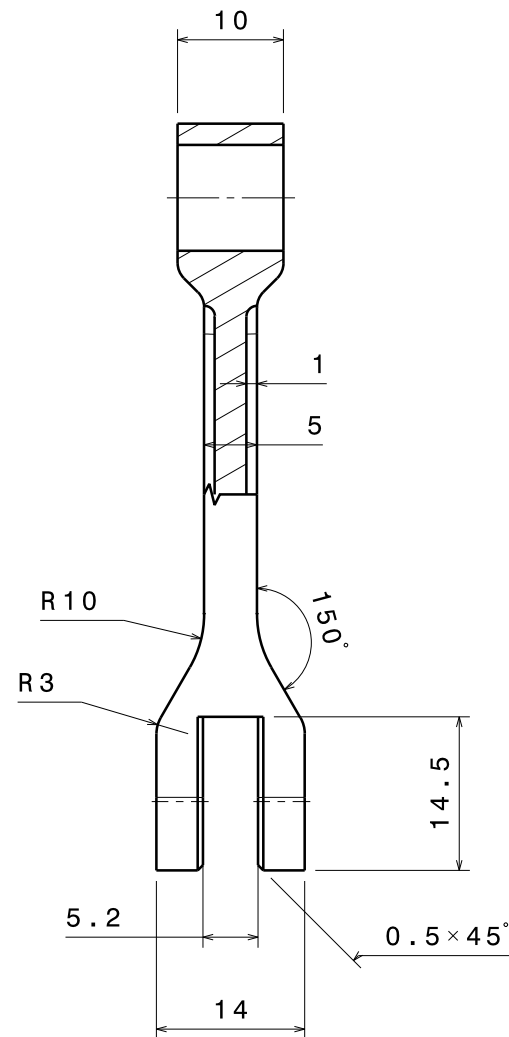
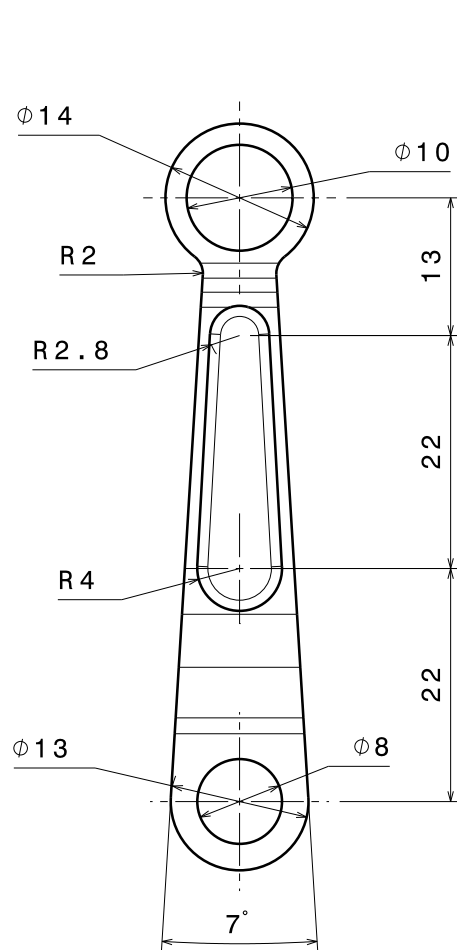
5:1



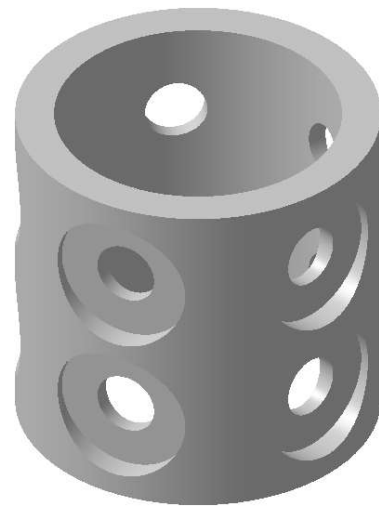
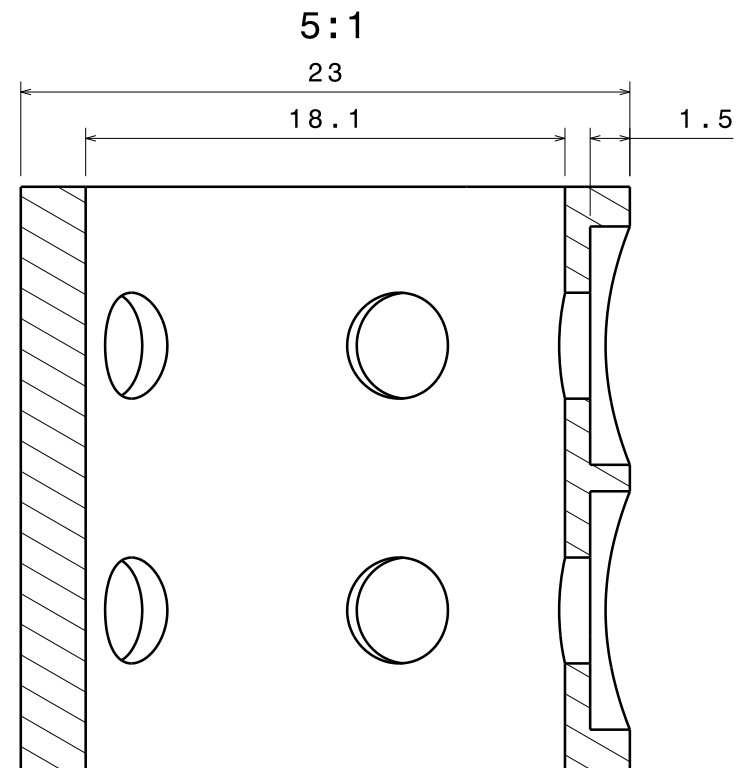
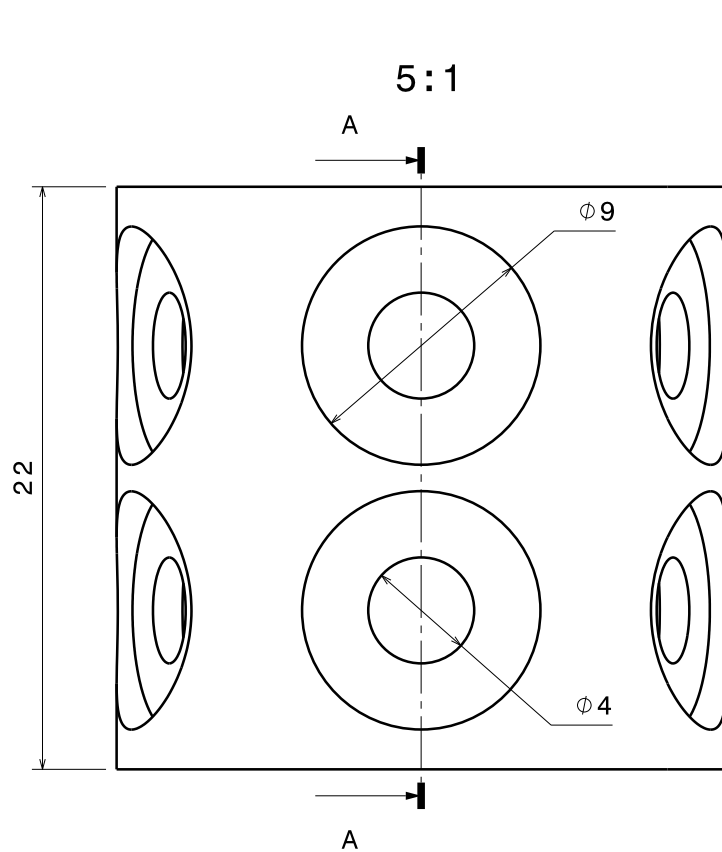
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	8/07	RAÚL S.		
COMPROBADO				
ESCALA:	MOTOR RADIAL ALOJADOR DE VARILLA			Nº PLANO 9/31
2:1				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



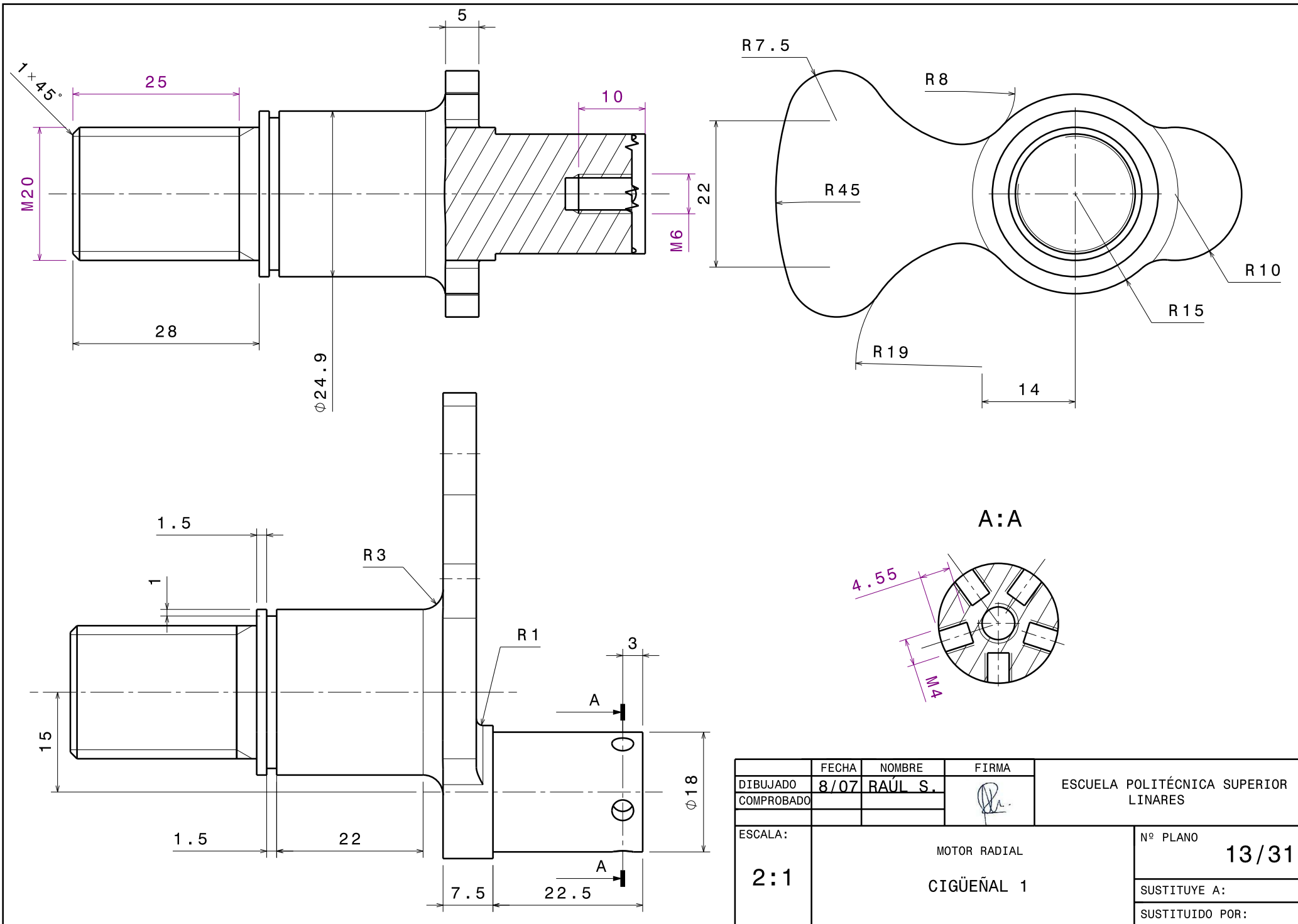
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO	8/07	RAÚL S.			
COMPROBADO					
ESCALA:	MOTOR RADIAL			Nº PLANO	
2:1	BIELA ESTRELLA			10/31	
				SUSTITUYE A:	
				SUSTITUIDO POR:	

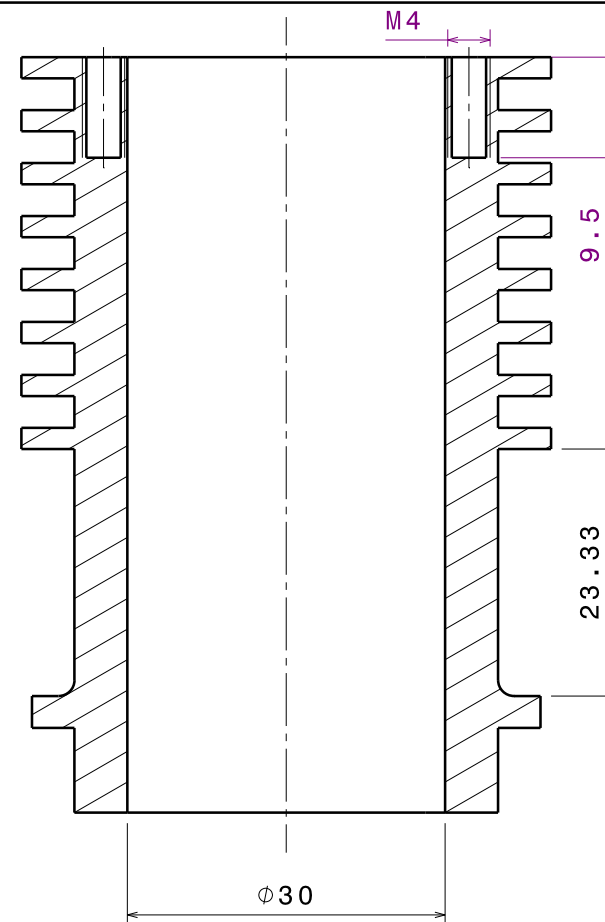
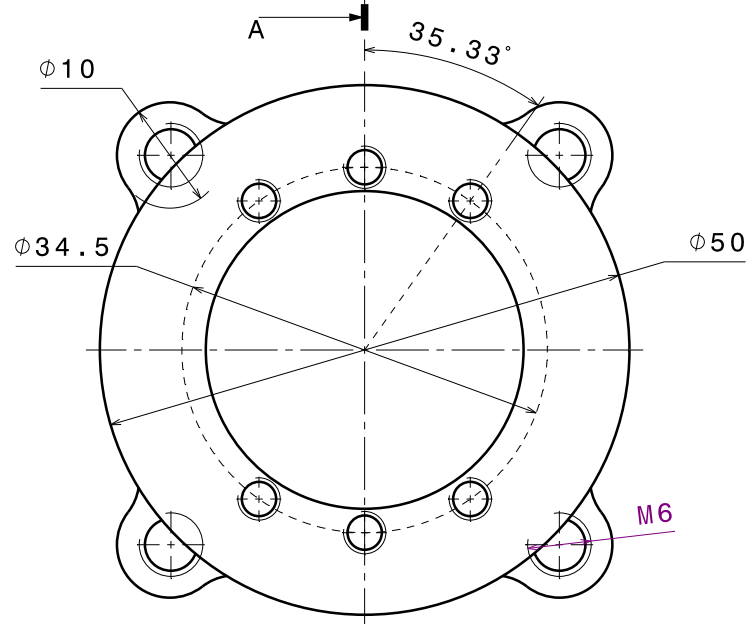
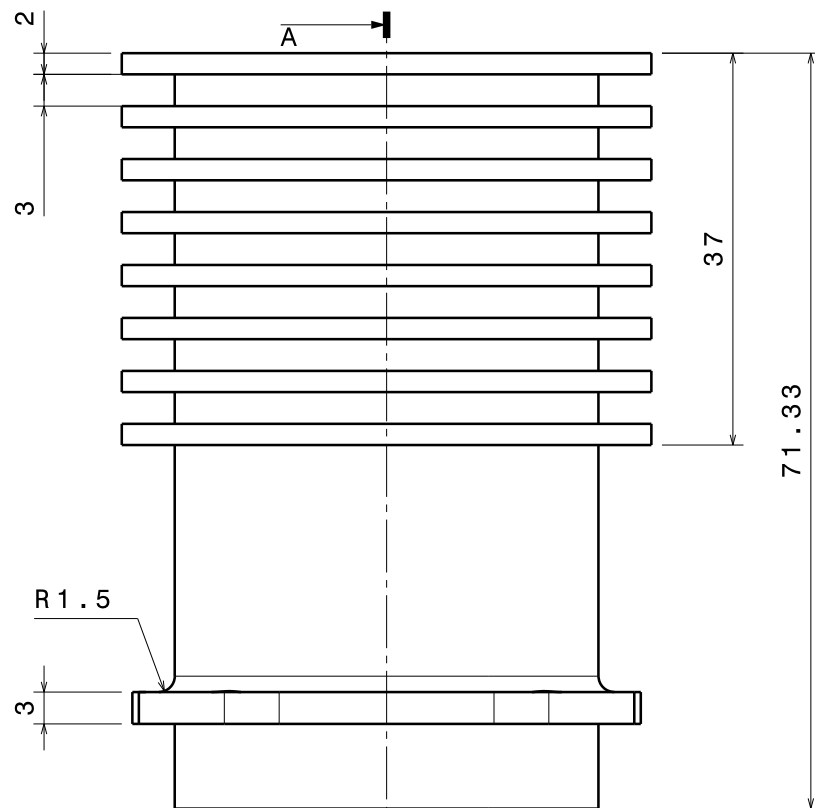


	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	8/07	RAÚL S.		
COMPROBADO				
ESCALA:	MOTOR RADIAL BIELA			Nº PLANO 11/31
2:1				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:

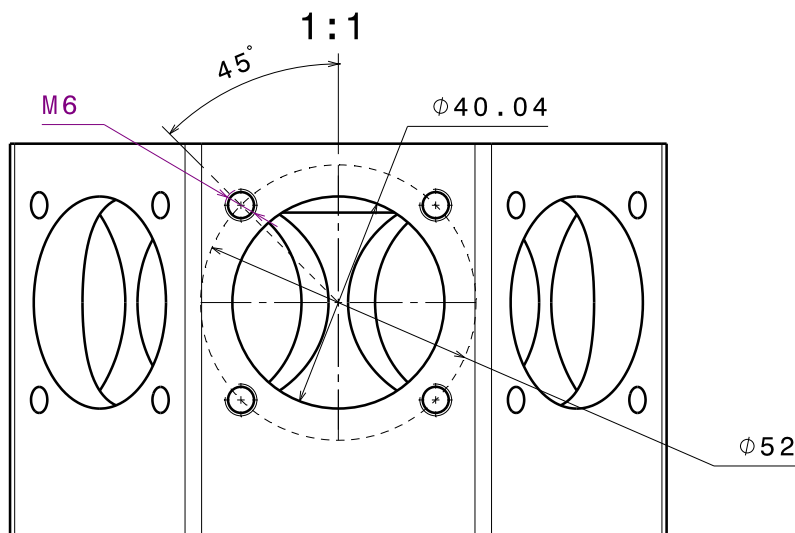
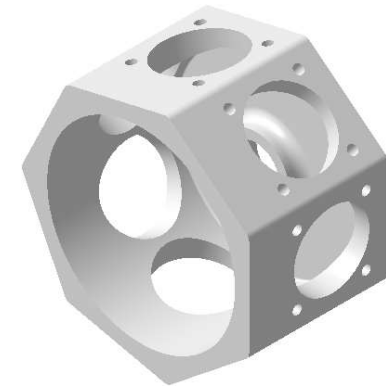
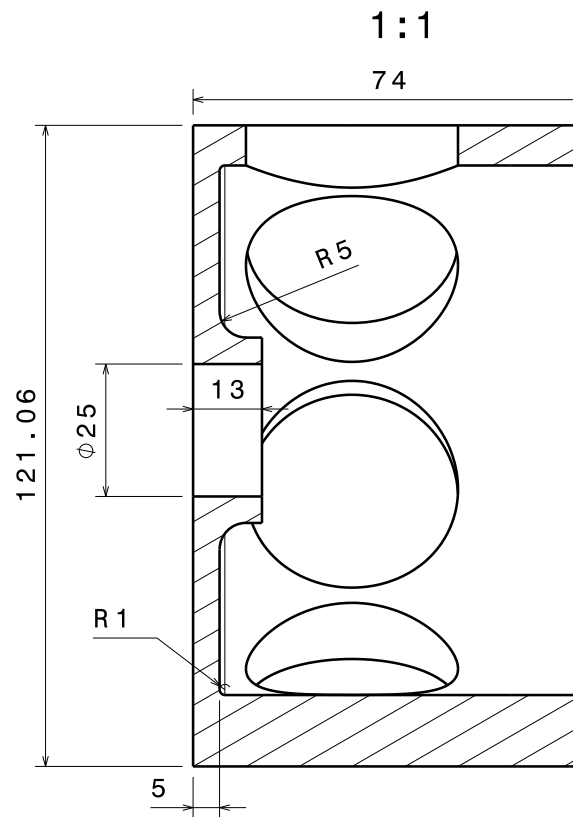
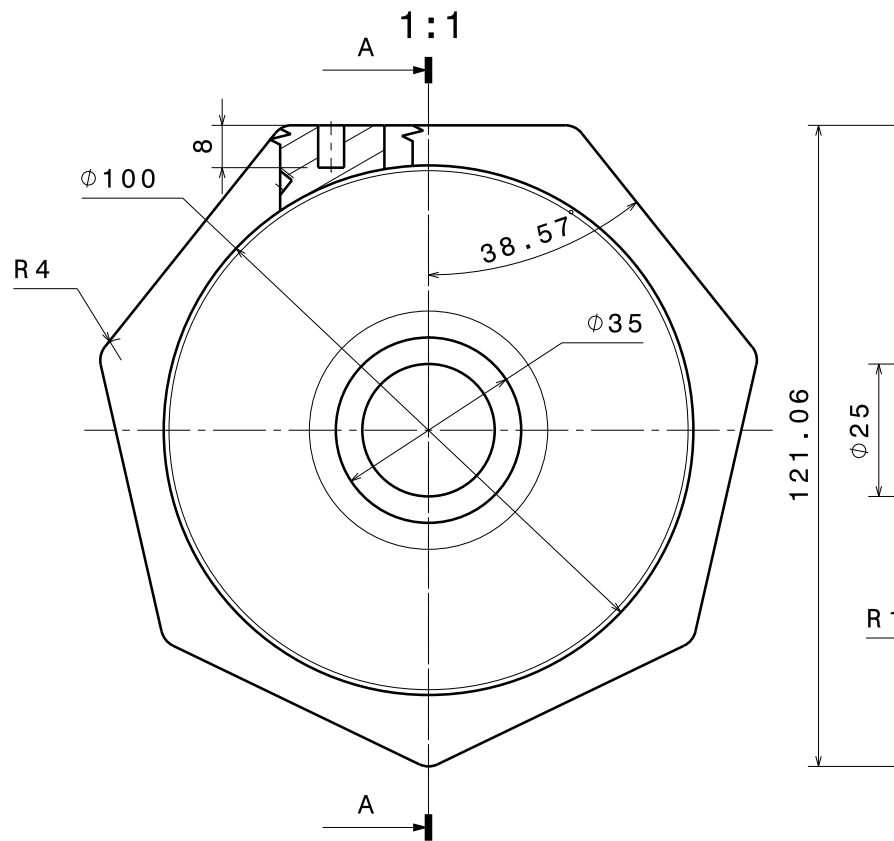


	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO	8/07	RAÚL S.			
COMPROBADO					
ESCALA:	MOTOR RADIAL CASQUILLO DE UNIÓN			Nº PLANO	12/31
2:1				SUSTITUYE A:	
				SUSTITUIDO POR:	

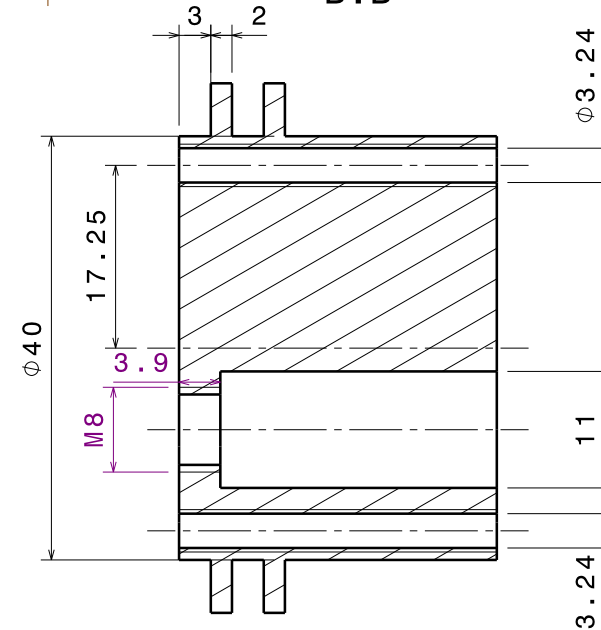
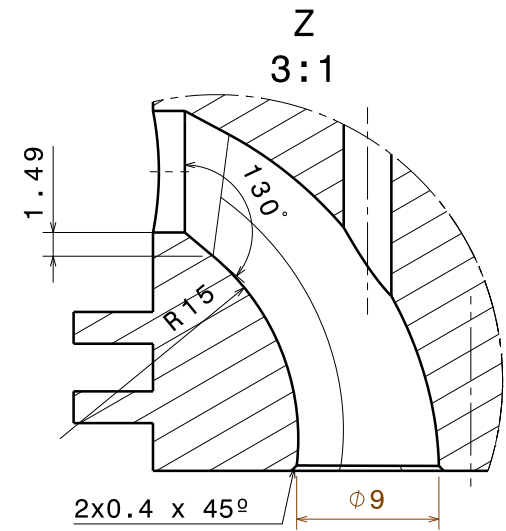
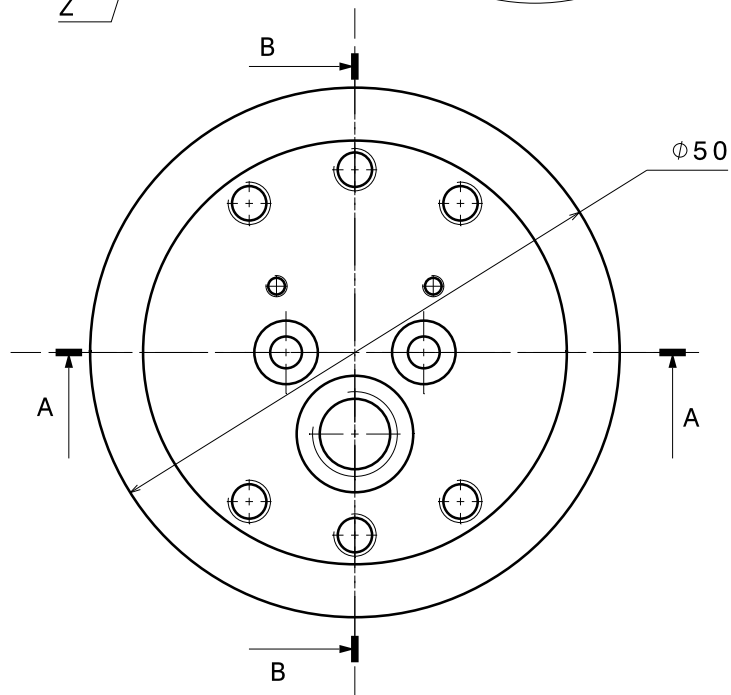




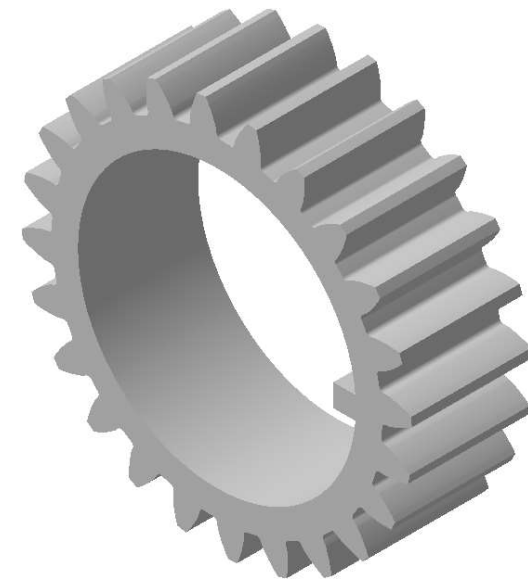
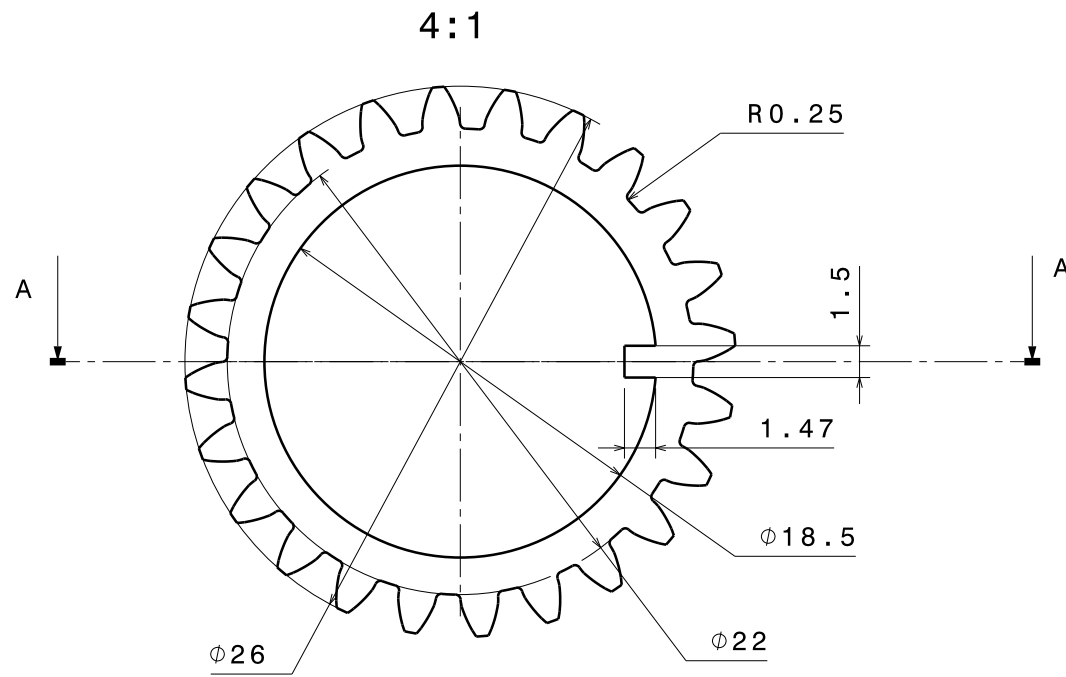
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	8/07	RAÚL S.		
COMPROBADO				
ESCALA:	MOTOR RADIAL CILINDRO			Nº PLANO
2:1				15/31
				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



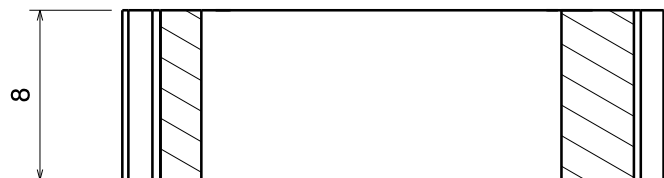
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	8/07	RAÚL S.		
COMPROBADO				
ESCALA:	MOTOR RADIAL			Nº PLANO
2:1	CUERPO			16/31
				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



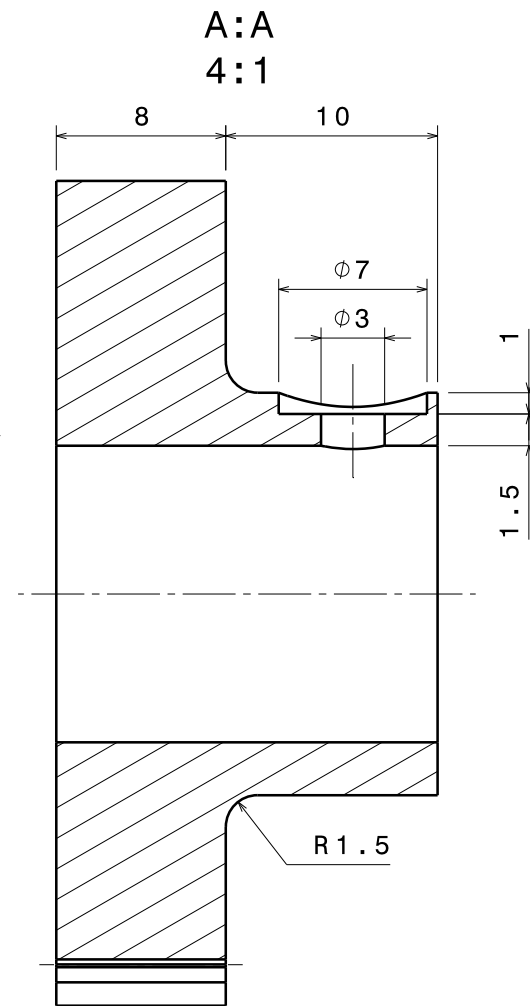
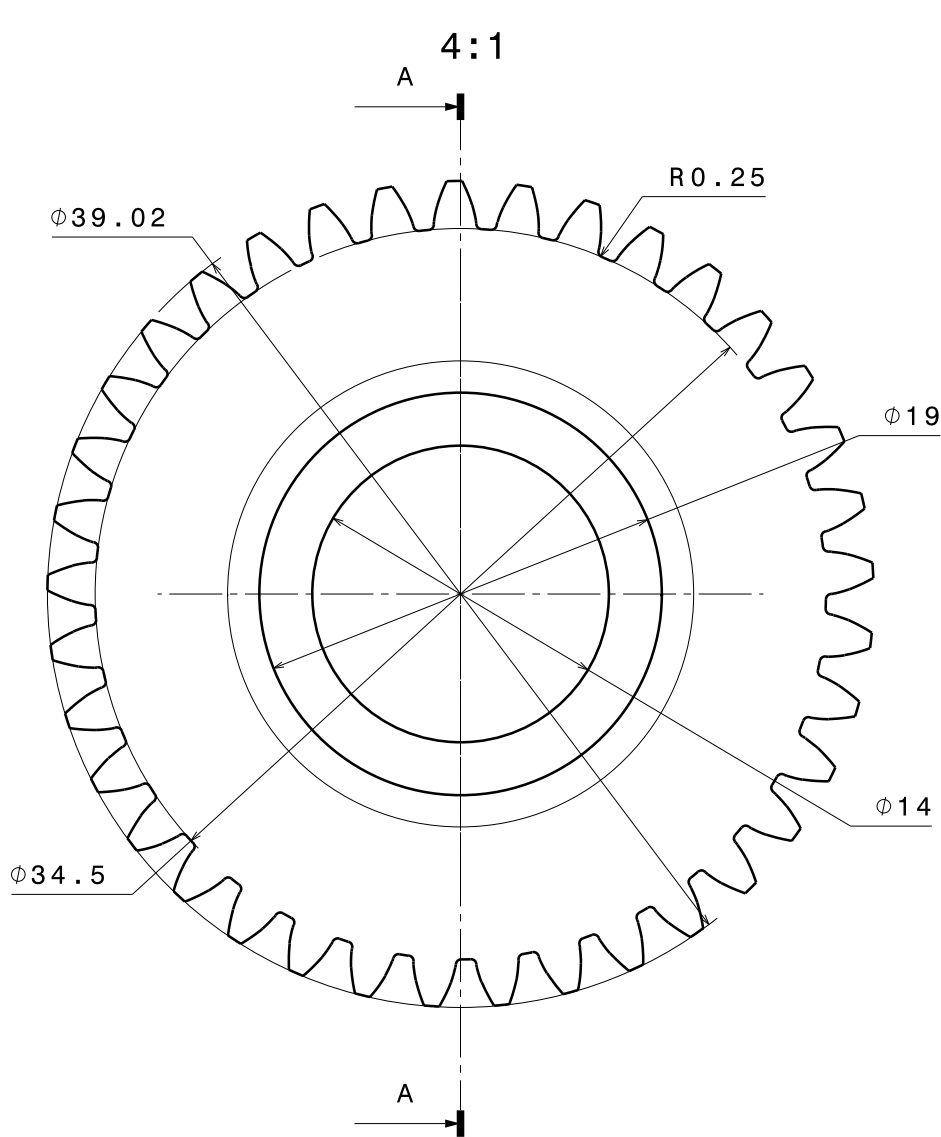
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	8/07	RAÚL S.		
COMPROBADO				
ESCALA:	MOTOR RADIAL CULATA			Nº PLANO 17/31
2:1				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



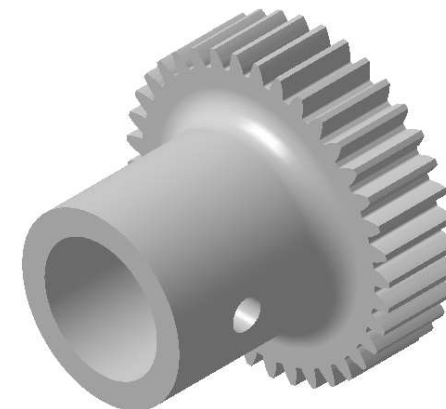
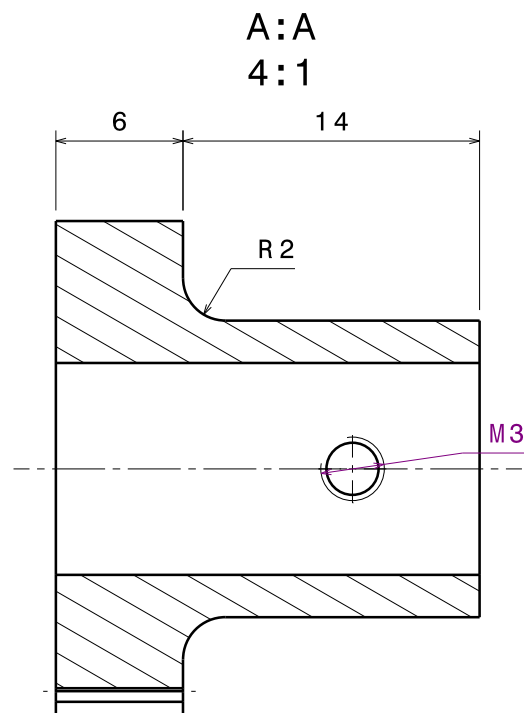
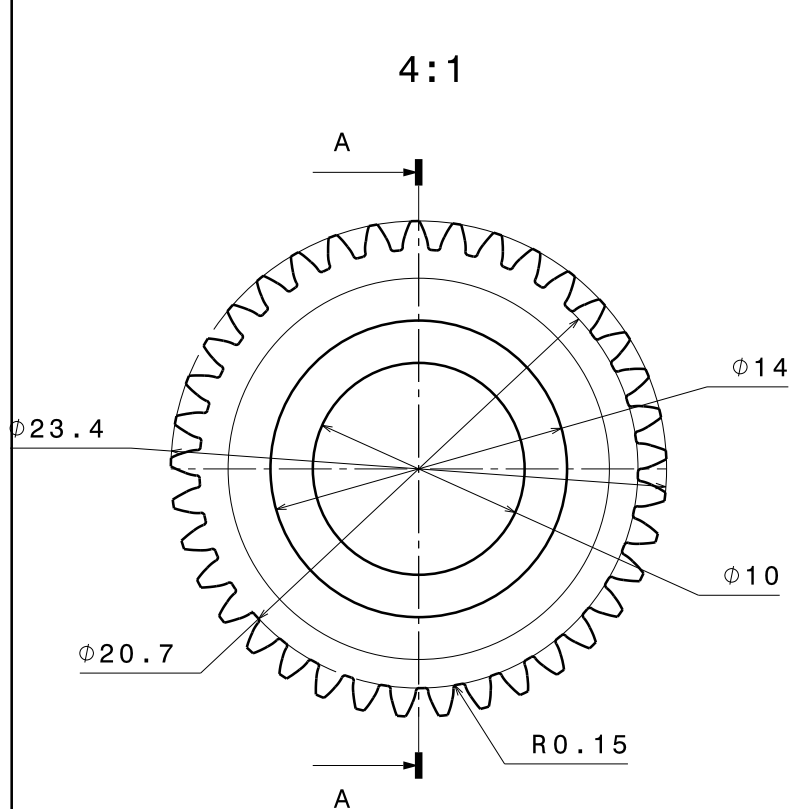
A:A
2:1



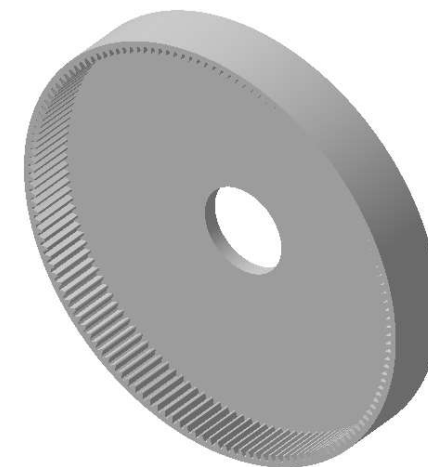
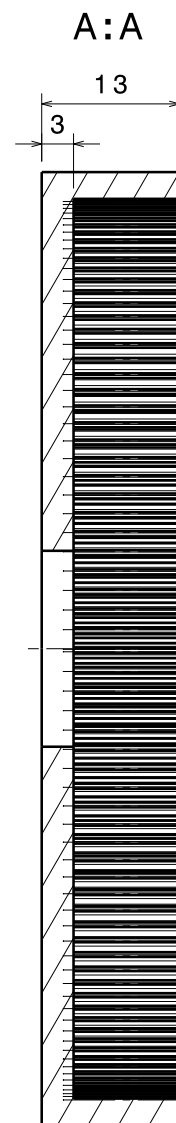
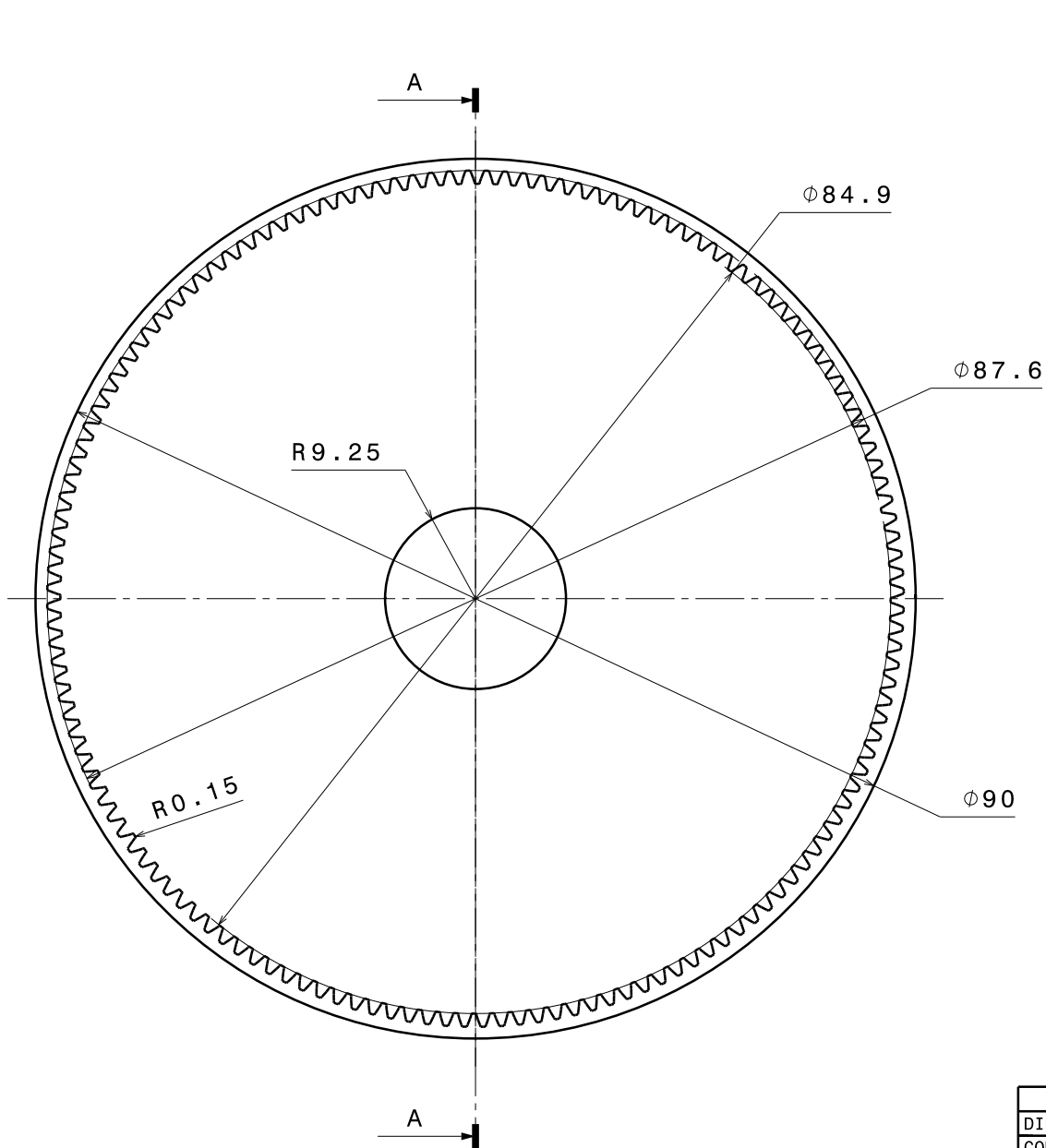
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	8/07	RAÚL S.		
COMPROBADO				
ESCALA:	MOTOR RADIAL ENGRANAJE 1			Nº PLANO 18/31
2:1				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



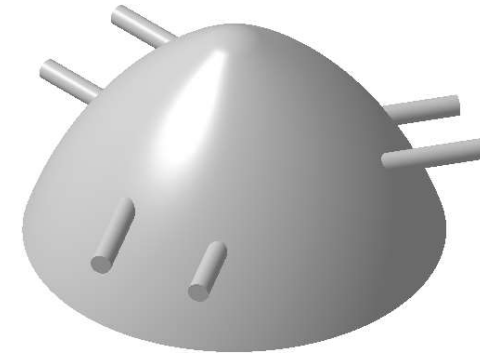
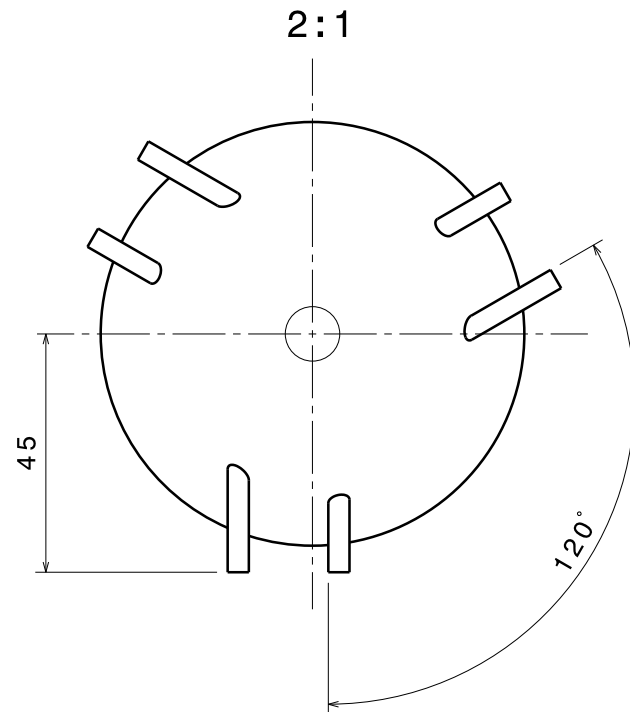
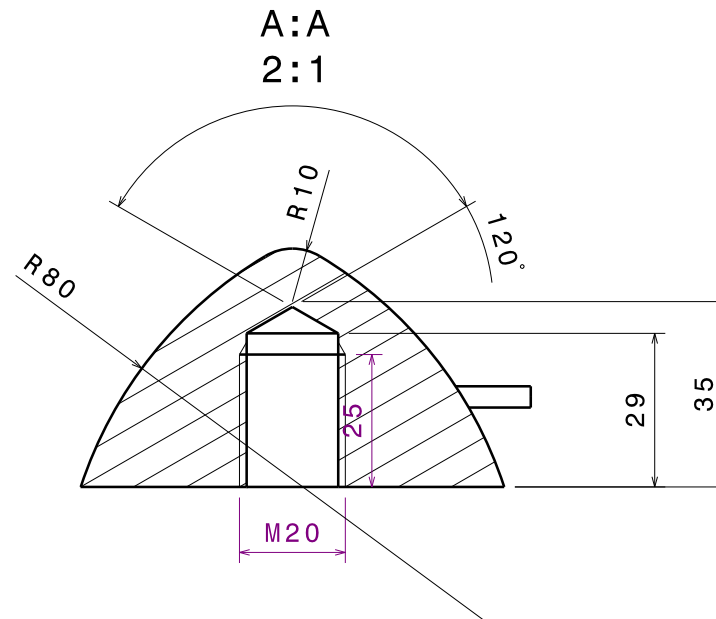
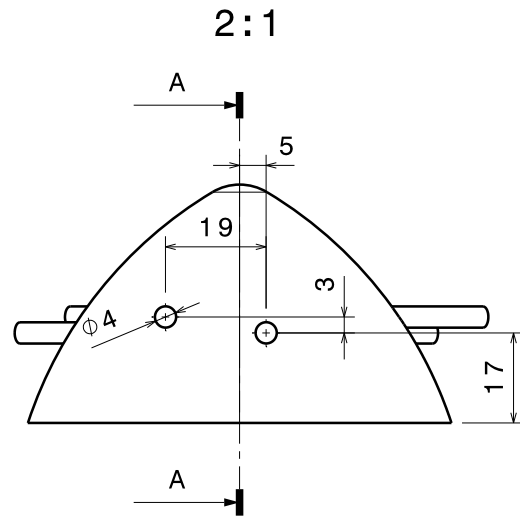
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	8/07	RAÚL S.		
COMPROBADO				
ESCALA:	MOTOR RADIAL ENGRANAJE 2			Nº PLANO 19/31
2:1				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



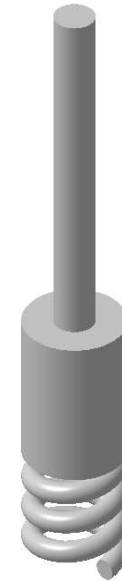
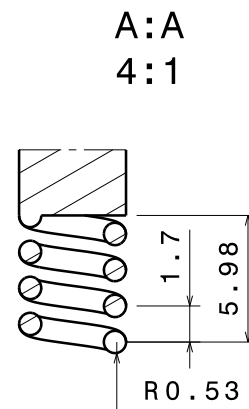
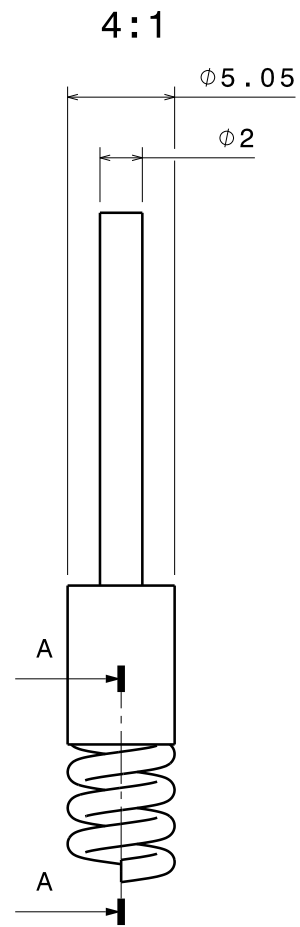
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	8/07	RAÚL S.		
COMPROBADO				
ESCALA:	MOTOR RADIAL ENGRANAJE 3			Nº PLANO 20/31
2:1				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



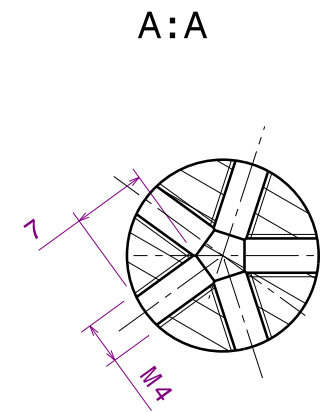
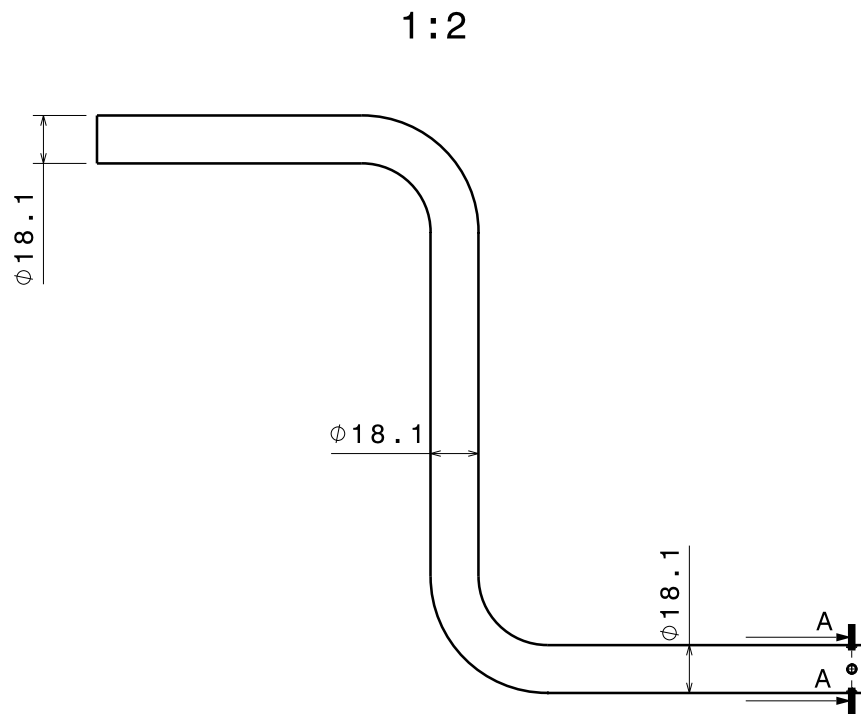
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	8/07	RAÚL S.		
COMPROBADO				
ESCALA:	MOTOR RADIAL ENGRANAJE 4			Nº PLANO 21/31
2:1				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



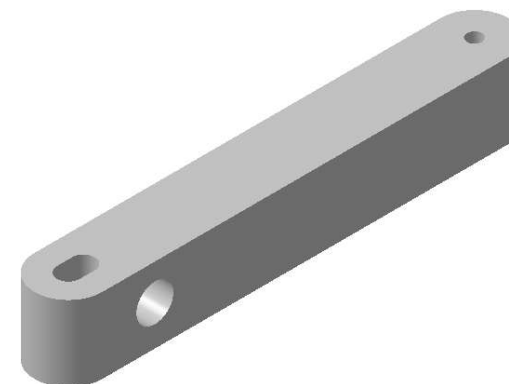
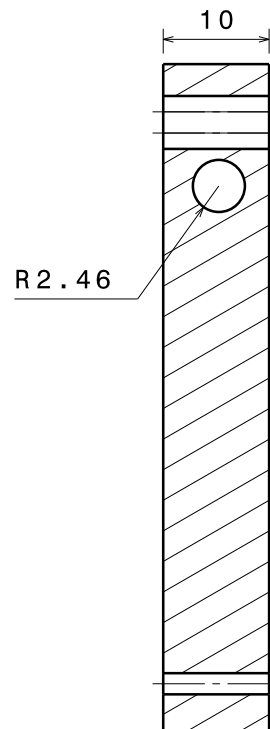
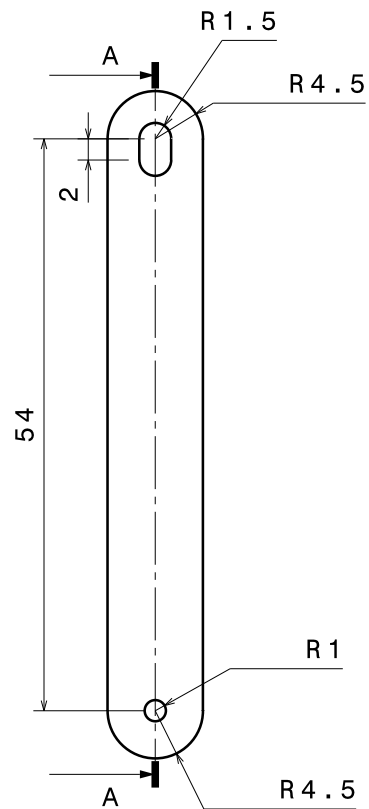
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	8/07	RAÚL S.		
COMPROBADO				
ESCALA:	MOTOR RADIAL CONO			Nº PLANO 22/31
2:1				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



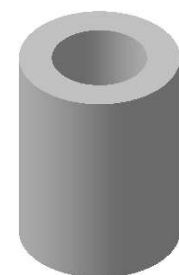
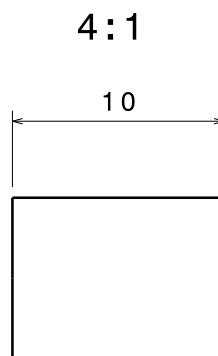
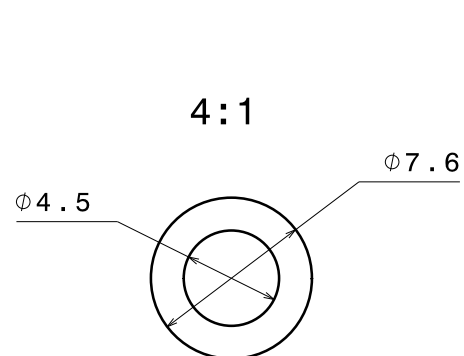
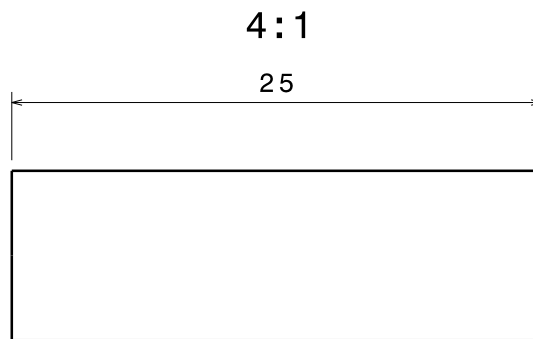
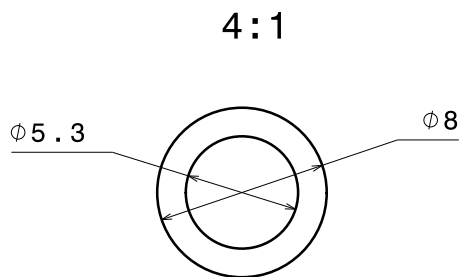
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	8/07	RAÚL S.		
COMPROBADO				
ESCALA:	MOTOR RADIAL MUELLE			Nº PLANO 23/31
2:1				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



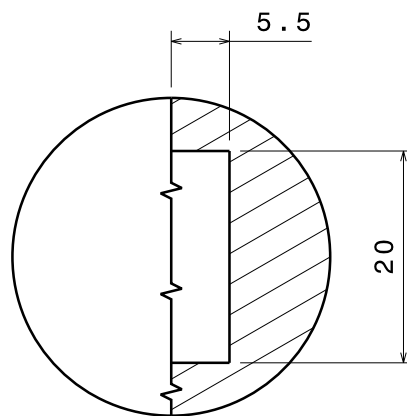
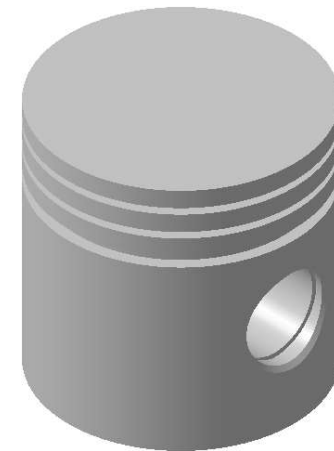
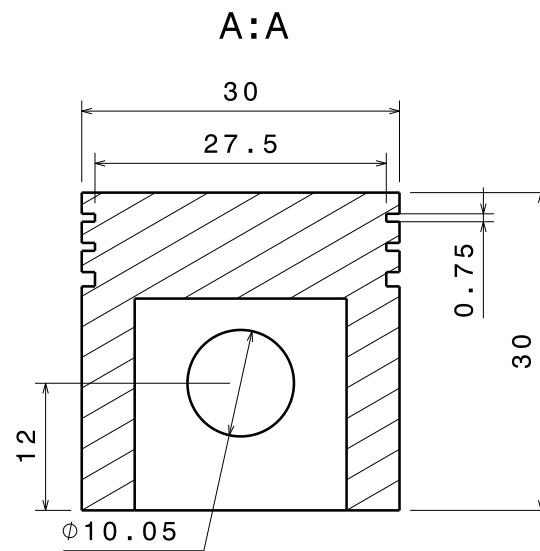
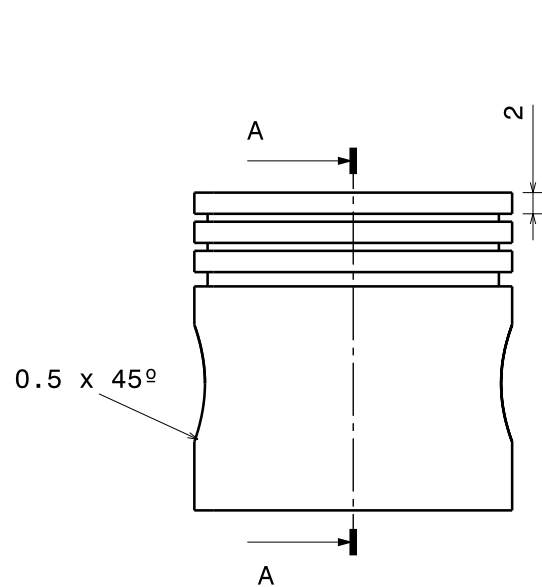
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	8/07	RAÚL S.		
COMPROBADO				
ESCALA:	MOTOR RADIAL MANIVELA DE MOVIMIENTO			Nº PLANO 24/31
2:1				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



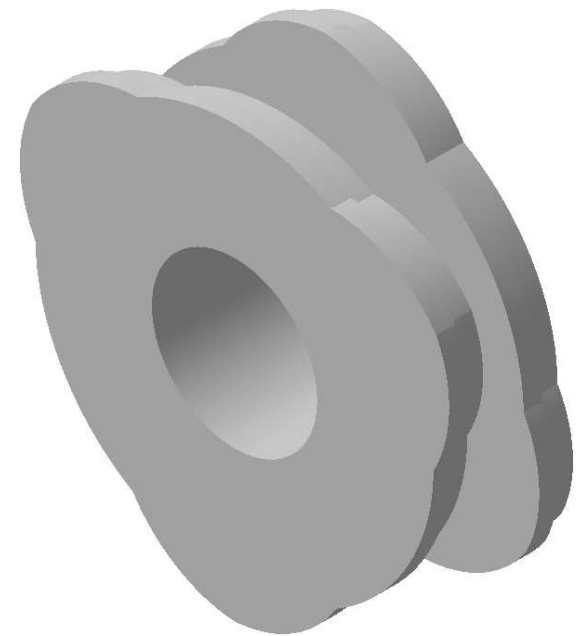
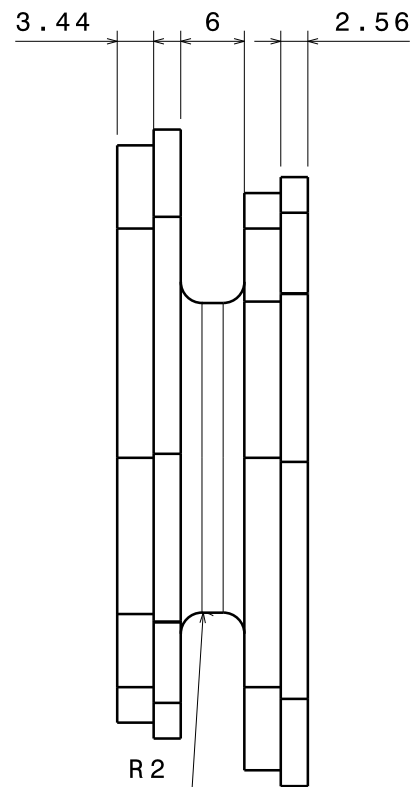
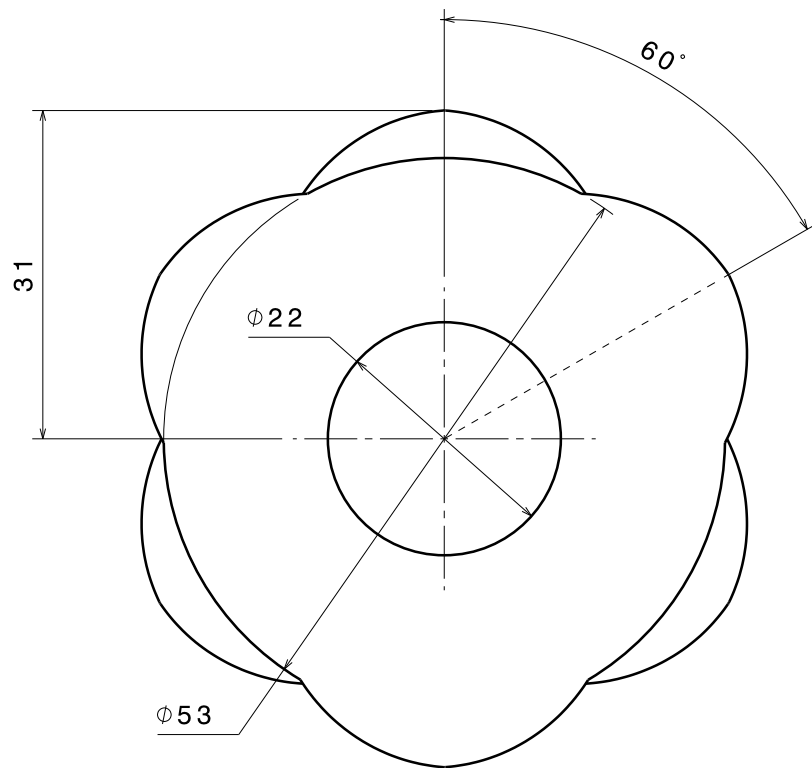
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	8/07	RAÚL S.		
COMPROBADO				
ESCALA:	MOTOR RADIAL PALANCA			Nº PLANO
2:1				25/31
				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



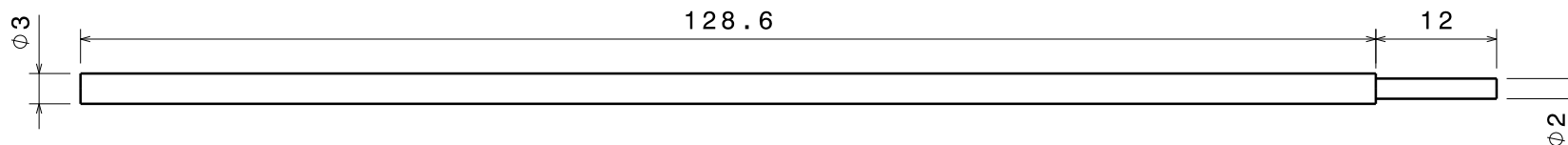
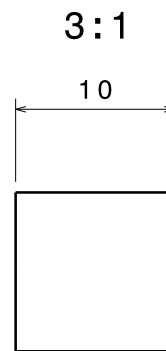
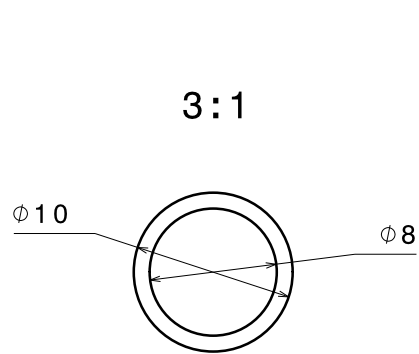
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	8/07	RAÚL S.		
COMPROBADO				
ESCALA:	MOTOR RADIAL BULÓN DE PISTÓN BULÓN DE BIELA-BIELA ESTRELLA			Nº PLANO 26/31
2:1				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



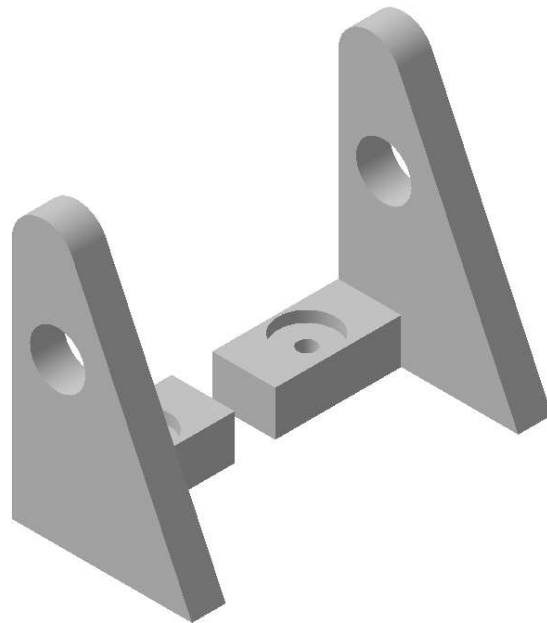
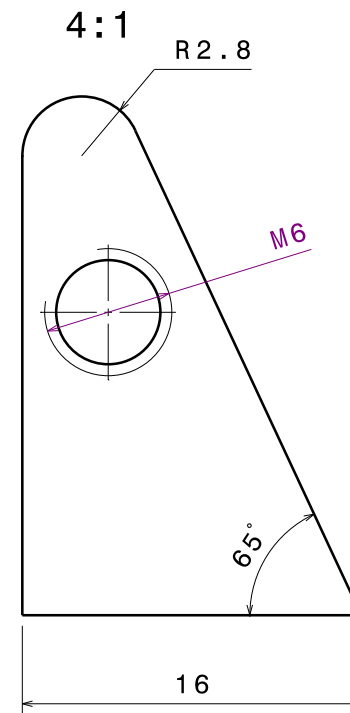
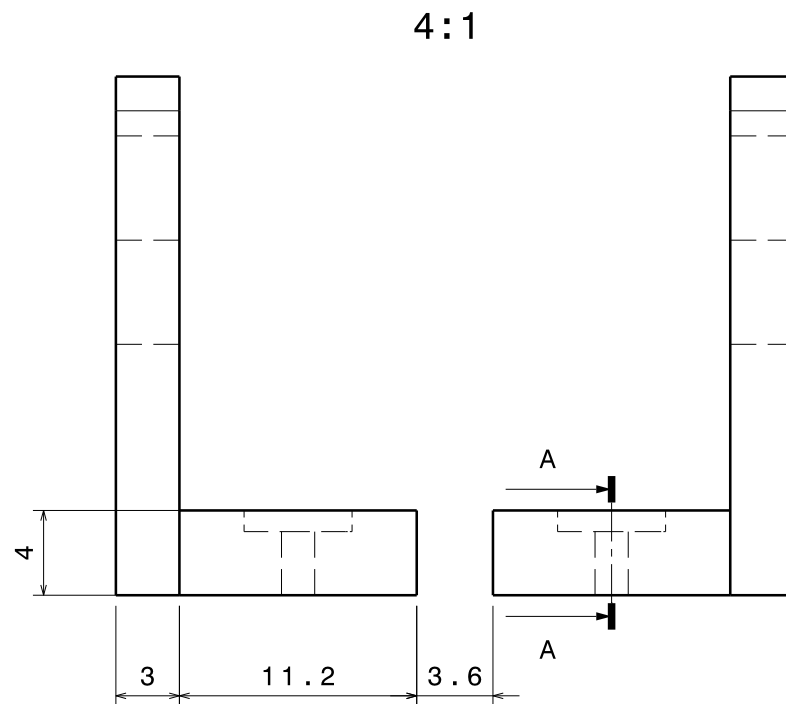
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	8/07	RAÚL S.		
COMPROBADO				
ESCALA:	MOTOR RADIAL			Nº PLANO
2:1	PISTÓN			27/31
				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



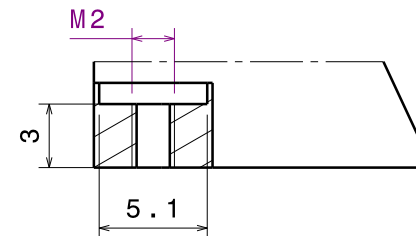
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	8/07	RAÚL S.		
COMPROBADO				
ESCALA:	MOTOR RADIAL PLATO DE LEVAS			Nº PLANO 28/31
2:1				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



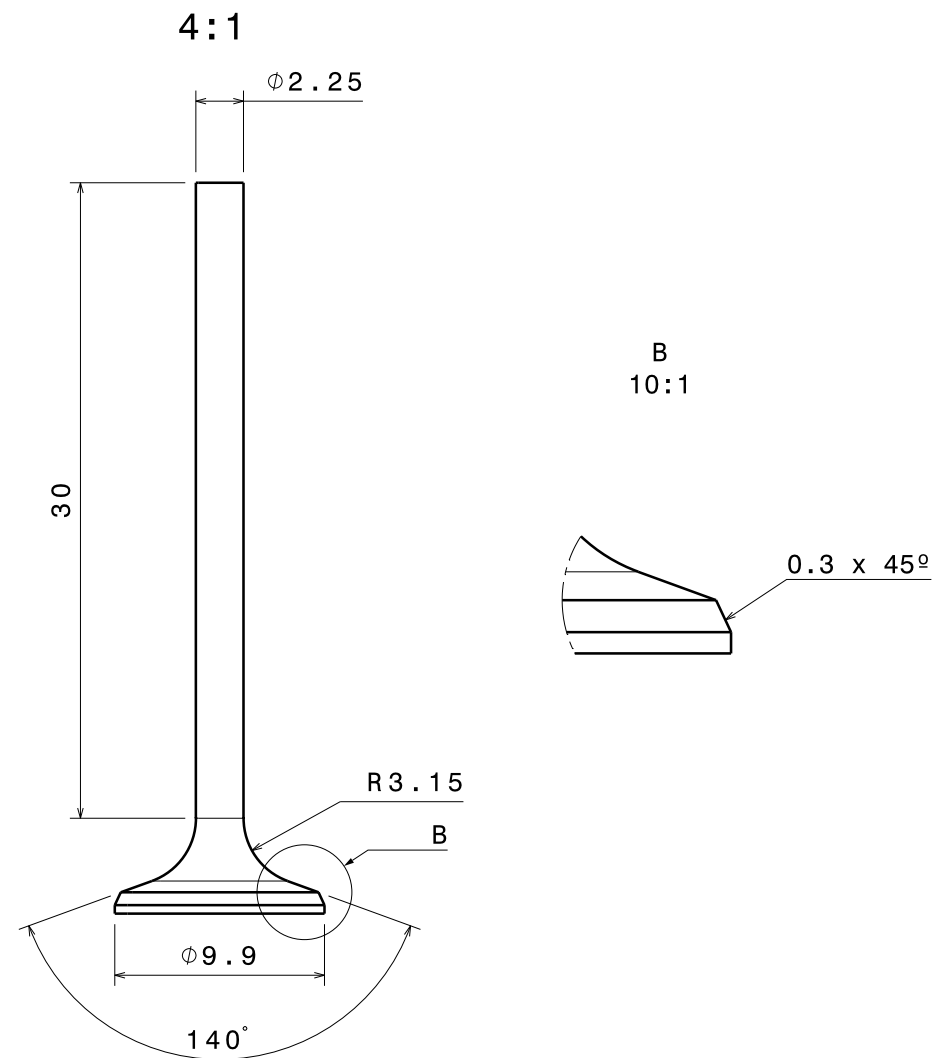
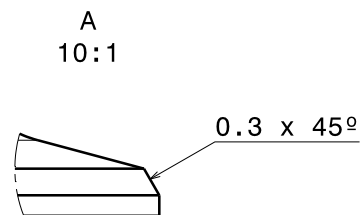
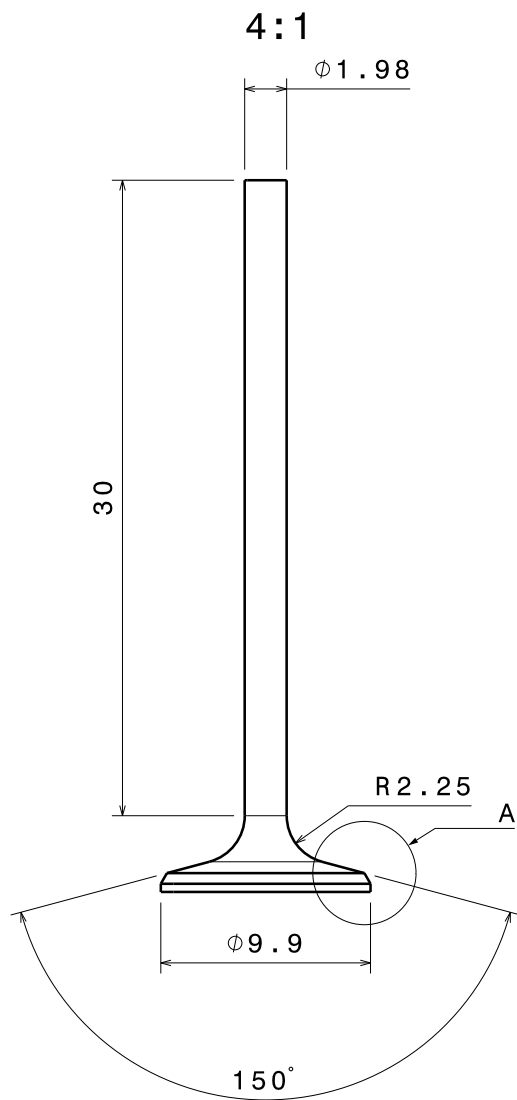
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	8/07	RAÚL S.		
COMPROBADO				
ESCALA:	MOTOR RADIAL SOBRE EJE VARILLA			Nº PLANO 29/31
2:1				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



A:A
4:1



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	8/07	RAÚL S.		
COMPROBADO				
ESCALA:	MOTOR RADIAL SOPORTE DE PALANCA			Nº PLANO 30/31
2:1				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	8/07	RAÚL S.		
COMPROBADO				
ESCALA:	MOTOR RADIAL VÁLVULA DE ADMISIÓN VÁLVULA DE ESCAPE			Nº PLANO 31/31
2:1				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR: