

Trabajo de Fin de Máster Máster en Ingeniería Aeronáutica

Estudio, modelado y recreación virtual de
un motor radial de 5 cilindros utilizando el
software Catia V5

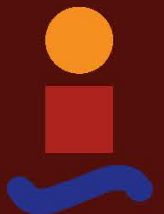
Autor: Jesús Jurado Ruiz

Tutores: Francisco Andrés Valderrama Gual

Manuel Morato Moreno

Dpto. Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024



Trabajo de Fin de Máster
Máster en Ingeniería Aeronáutica

**Estudio, modelado y recreación virtual de un
motor radial de 5 cilindros utilizando el software
Catia V5**

Autor:

Jesús Jurado Ruiz

Tutores:

Francisco Andrés Valderrama Gual
Manuel Morato Moreno

Dpto. Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024

Trabajo de Fin de Máster: Estudio, modelado y recreación virtual de un motor radial de 5 cilindros utilizando el software Catia V5

Autor: Jesús Jurado Ruiz

Tutores: Francisco Andrés Valderrama Gual
Manuel Morato Moreno

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que me han acompañado a lo largo de este máster, ya que sin su apoyo no habría sido posible alcanzar este logro. A Francisco y Manuel, mis tutores, les agradezco profundamente su gran profesionalidad y su valiosa ayuda durante el desarrollo de este proyecto. Su guía y conocimientos han sido fundamentales para mi progreso, y siempre estaré agradecido por su dedicación y paciencia.

A mi familia, gracias por vuestra confianza, vuestro tiempo y vuestro apoyo incondicional durante todos estos años. Vuestras palabras de aliento y vuestra fe en mis capacidades me han motivado a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles. Este logro también es vuestro.

A mis amigos y compañeros de clase, gracias por los momentos compartidos y por vuestra compañía en este viaje. Las discusiones, el trabajo en equipo y los momentos de diversión han hecho de esta experiencia algo inolvidable y enriquecedor.

Y, especialmente, a Zahira, porque sin tu apoyo y comprensión todo hubiera sido mucho más complicado. Tu paciencia, amor y constante ánimo han sido un pilar fundamental en este proceso. Gracias por estar siempre a mi lado y por creer en mí.

Finalmente, quiero agradecer a todos los profesores y personal administrativo del máster por su dedicación y esfuerzo. Su compromiso con la educación y el bienestar de los estudiantes ha sido evidente en cada paso del camino.

Jesús Jurado Ruiz
Sevilla, 2024

Resumen

En este proyecto se aborda el estudio, modelado y recreación virtual de un motor radial de 5 cilindros utilizando el software CATIA V5. El objetivo principal del proyecto ha sido comprender y reproducir con precisión la geometría y el funcionamiento de este tipo de motor, ampliamente utilizado en el aeromodelismo.

El estudio comienza con una revisión de la historia y los principios de operación de los motores radiales, seguida de una descripción técnica de sus componentes principales y su disposición.

A continuación, se procede al modelado tridimensional del motor en CATIA V5. Comenzando con el modelado de cada componente y siguiendo con su ensamblaje.

Finalmente, se genera una simulación cinemática (recreación virtual) para garantizar que el modelo replica fielmente el comportamiento del motor real.

Abstract

This project deals with the study, modelling and virtual recreation of a 5-cylinder radial engine using CATIA V5 software. The main objective of the project has been to understand and accurately reproduce the geometry and operation of this type of engine, which is widely used in aeromodelling.

The study begins with a review of the history and operating principles of radial engines, followed by a technical description of their main components and their layout.

This is followed by the three-dimensional modelling of the engine in CATIA V5. Starting with the modelling of each component and continuing with its assembly.

Finally, a kinematic simulation (virtual recreation) is generated to ensure that the model faithfully replicates the behaviour of the real engine.

Índice Abreviado

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
1 Introducción	1
1.1 Objetivo	1
1.2 Pasos a seguir	1
1.3 Organización del documento	1
2 El motor de combustión interna	3
2.1 Antecedentes históricos	3
2.2 Componentes del motor de combustión interna	7
2.3 Configuraciones del motor de combustión	10
2.4 El motor radial de combustión interna	12
3 Software empleado. Catia V5	13
3.1 Mechanical Design / Part Design	13
3.2 Mechanical Design / Assembly Design	14
3.3 Digital Mockup / DMU Kinematics	14
4 Modelado y renderizado del motor	17
4.1 Modelado y renderizado de las Drawing Parts	19
4.2 Modelado y renderizado de las Standard Parts	58
4.3 Modelado y renderizado de las Company Parts	66
5 Resultado final del modelado y renderizado	71
6 Estudio de la cinemática del motor	77
7 Conclusiones	81
Apéndice A Cálculo de engranajes	83
A.1 Part 57	83
A.2 Part 58	84

A.3	Part 59	84
A.4	Part 29	85
	<i>Índice de Figuras</i>	87
	<i>Bibliografía</i>	91

Índice

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
1 Introducción	1
1.1 Objetivo	1
1.2 Pasos a seguir	1
1.3 Organización del documento	1
2 El motor de combustión interna	3
2.1 Antecedentes históricos	3
2.2 Componentes del motor de combustión interna	7
2.3 Configuraciones del motor de combustión	10
2.4 El motor radial de combustión interna	12
3 Software empleado. Catia V5	13
3.1 Mechanical Design / Part Design	13
3.2 Mechanical Design / Assembly Design	14
3.3 Digital Mockup / DMU Kinematics	14
4 Modelado y renderizado del motor	17
4.1 Modelado y renderizado de las Drawing Parts	19
4.1.1 Part 01. Inlet manifold	19
4.1.2 Part 02. Exhaust manifold	20
4.1.3 Part 03. Washer for master rod	21
4.1.4 Part 05. Washer 1	22
4.1.5 Part 06. Washer 2	23
4.1.6 Part 08. Spring plate	24
4.1.7 Part 11. Master rod	25
4.1.8 Part 12. Bell crank	26
4.1.9 Part 13. Bell crank support	27
4.1.10 Part 14. Bell crank shaft	28
4.1.11 Part 15. Chuck cone for propeller driver	29
4.1.12 Part 16. Piston	30
4.1.13 Part 17. Piston pin	31
4.1.14 Part 17a. Piston pin cap	32

4.1.15	Part 18. Piston ring	33
4.1.16	Part 19. Crank case	34
4.1.17	Part 20. Crank	35
4.1.18	Part 24. Bush	36
4.1.19	Part 27. Assembly flange	37
4.1.20	Part 29. Cam rod gear, 60 teeth, modul 1	38
4.1.21	Part 30. Cam rod	39
4.1.22	Part 31. Cam rod housing	40
4.1.23	Part 33. Link rod	41
4.1.24	Part 34. Rod bolt	42
4.1.25	Part 35. Propeller driver	43
4.1.26	Part 36. Suction housing cap	44
4.1.27	Part 45. Spinner	45
4.1.28	Part 46. Cam follower	46
4.1.29	Part 47. Slide guiding	47
4.1.30	Part 49. Valve	48
4.1.31	Part 51. Valve cap	49
4.1.32	Part 53. Screw connection	50
4.1.33	Part 57. Gear, 15 teeth, modul 1	51
4.1.34	Part 58. Gear, 22 teeth, modul 1	52
4.1.35	Part 59. Gear crank, 22 teeth, modul 1	53
4.1.36	Part 60. Intermediate shaft	54
4.1.37	Part 61. Cylinder	55
4.1.38	Part 62. Cylinder head	56
4.1.39	Part 64. Cylinder liner	57
4.2	Modelado y renderizado de las Standard Parts	58
4.2.1	Part 07. Adjusting screw, valve clearance	58
4.2.2	Part 26. Hexagon socket set screw	58
4.2.3	Part 28. Nut	59
4.2.4	Part 32. O-ring	59
4.2.5	Part 37. Socket screw	60
4.2.6	Part 38. Socket screw	60
4.2.7	Part 39. Socket screw	61
4.2.8	Part 40. Socket screw	61
4.2.9	Part 41. Socket screw	62
4.2.10	Part 42. Socket screw	62
4.2.11	Part 43. Countersunk socket screw	63
4.2.12	Part 54. Shaft locking clip, 15 mm	63
4.2.13	Part 54a. Shaft locking clip shim, 3 mm	64
4.2.14	Part 55. Shaft locking clip shim, 4 mm	64
4.2.15	Part 56. Shaft locking clip shim, 10 mm	65
4.3	Modelado y renderizado de las Company Parts	66
4.3.1	Part 21. Bearing 6001-2RS	66
4.3.2	Part 22. Bearing 6003-2RS	66
4.3.3	Part 23. Bearing Double Row 4202B TVH	67
4.3.4	Part 25. Needle Bearing NA4901	67
4.3.5	Part 48. Push rod	68
4.3.6	Part 50. Valve spring	69

4.3.7	Part 63. Cylinder head gasket	69
5	Resultado final del modelado y renderizado	71
6	Estudio de la cinemática del motor	77
7	Conclusiones	81
Apéndice A	Cálculo de engranajes	83
A.1	Part 57	83
A.2	Part 58	84
A.3	Part 59	84
A.4	Part 29	85
	<i>Índice de Figuras</i>	87
	<i>Bibliografía</i>	91

1 Introducción

1.1 Objetivo

El objetivo del presente proyecto es el estudio, modelado y recreación virtual en el software Catia V5 de un motor radial de combustión interna de 5 cilindros empleado en avionetas de aeromodelismo.

1.2 Pasos a seguir

Los pasos a seguir para el desarrollo del presente proyecto son los siguientes:

1. Contextualización histórica y estudio teórico del funcionamiento del motor de forma global para tener una visión general del problema a tratar.
2. Modelado y renderizado de cada una de las piezas que componen el motor en el software Catia V5.
3. Montaje y renderizado del conjunto completo en Catia V5 partiendo de las piezas anteriormente modeladas.
4. Realización de la simulación cinemática del mecanismo en Catia V5.

1.3 Organización del documento

El documento desarrollado sigue la siguiente estructura:

En primer lugar, se hace un análisis del estado del arte de los motores de combustión realizando un repaso de su historia, mencionando las principales partes que los componen y llevando a cabo una división por categorías. A continuación, dentro de los motores de combustión interna, se contextualiza el motor radial de combustión interna y se comenta su aplicación en el aeromodelismo. A continuación, se describe el software CAD utilizado para el desarrollo del proyecto (Catia V5) así como los módulos y funciones utilizadas dentro del mismo.

Posteriormente, se explica el proceso de modelado seguido para cada una de las piezas que componen el motor y se comentan las principales funcionalidades de las mismas.

Después, se muestran los resultados obtenidos tras el ensamblaje de las componentes modeladas. Finalmente, se explica el proceso seguido para llevar a cabo la simulación de la cinemática del motor. Además, se mostrará un vídeo de dicha simulación durante la defensa del presente proyecto con el objetivo de ilustrar el movimiento del mecanismo.

2 El motor de combustión interna

Los motores de combustión interna han sido fundamentales para la transformación de la sociedad moderna dado que han permitido el desarrollo de vehículos motorizados y maquinaria industrial que han revolucionado nuestro día a día.

2.1 Antecedentes históricos

Este tipo de tecnología nace como una respuesta a la búsqueda de alternativas a la tracción animal.



Figura 2.1 Vehículo de tracción animal [1].

La primera patente de un motor de combustión interna fue otorgada a Robert Street en el año 1794, el cual experimentó con un motor que empleaba una mezcla de gas y aire. No obstante, fue Philippe Lebon quien, en 1801, patentó un motor de gas que se considera como uno de los primeros motores de combustión interna.



Figura 2.2 Philippe Lebon [2].

Posteriormente, en 1859, el ingeniero belga Jean Joseph Etienne Lenoir desarrolló y patentó un motor a gas de dos tiempos que funcionaba de forma continua. Dicho motor empleaba gas de carbón y se accionaba por medio de una chispa eléctrica. A pesar de no ser demasiado eficiente, supuso un hito muy importante en la historia de los motores de combustión interna. Lenoir construyó unos 500 motores de este tipo, los cuales se emplearon para diversos fines industriales.



Figura 2.3 Jean Joseph Etienne Lenoir [3].

Sin embargo, la verdadera revolución en los motores de combustión interna llegó en 1876, cuando Nikolaus Otto creó el motor de cuatro tiempos.



Figura 2.4 Nikolaus Otto [4].

Este motor consiguió mejorar considerablemente la eficiencia y la potencia con respecto a sus antecesores. Sigue el conocido como ciclo Otto, compuesto de cuatro fases:

- **Admisión.** en esta fase el descenso del pistón aspira la mezcla aire combustible en los motores de encendido provocado (MEP) o el aire en motores de encendido por compresión (MEC). La válvula de escape permanece cerrada, mientras que la de admisión está abierta. En el primer tiempo el cigüeñal gira 180° y el árbol de levas da 90° . La válvula de admisión se encuentra abierta y la carrera que realiza el pistón es descendente. [5]
- **Compresión.** al llegar al final de la carrera inferior, la válvula de admisión se cierra, comprimiendo el gas contenido en la cámara por el ascenso del pistón. En el segundo tiempo el

cigüeñal da 180° y el árbol de levas da 90° , y además ambas válvulas se encuentran cerradas y su carrera es ascendente. [5]

- **Expansión.** al llegar al final de la carrera superior el gas ha alcanzado la presión máxima. En los motores de encendido provocado o de ciclo Otto salta la chispa en la bujía, provocando la inflamación de la mezcla, mientras que en los motores diésel, se inyecta a través del inyector el combustible muy pulverizado, que se autoinflama por la presión y temperatura existentes en el interior del cilindro. En ambos casos, una vez iniciada la combustión, esta progresa rápidamente incrementando la temperatura y la presión en el interior del cilindro y expandiendo los gases que empujan el pistón. Esta es la única fase en la que se obtiene trabajo. En este tiempo el cigüeñal gira 180° mientras que el árbol de levas gira 90° respectivamente, ambas válvulas se encuentran cerradas y su carrera es descendente. [5]
- **Escape.** en esta fase el pistón empuja, en su movimiento ascendente, los gases de la combustión que salen a través de la válvula de escape que permanece abierta. Al llegar al punto máximo de carrera superior, se cierra la válvula de escape y se abre la de admisión, reiniciándose el ciclo. En este tiempo el cigüeñal gira 180° y el árbol de levas gira 90° . [5]

Este diseño sigue siendo la base de muchos motores actuales.

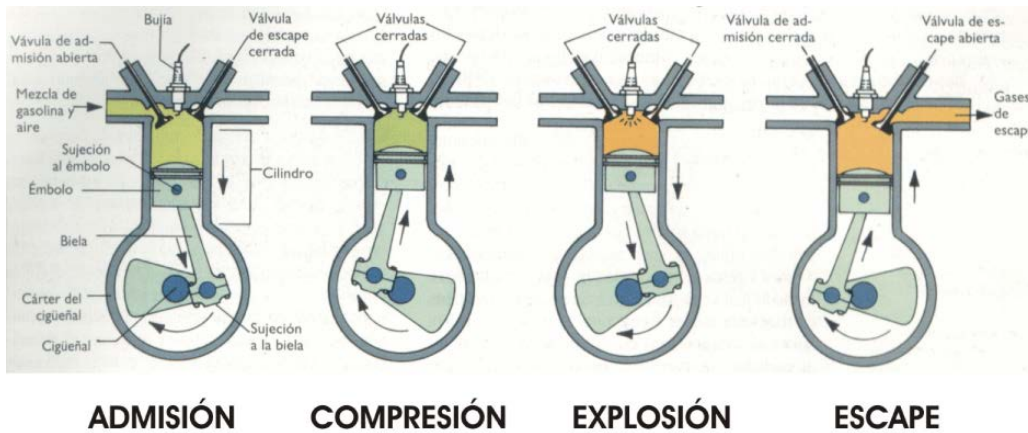


Figura 2.5 Ciclo de Otto [6].

Unos años después de la irrupción del motor de cuatro tiempos de Nikolaus Otto, en 1892, Rudolf Diesel patentó un nuevo tipo de motor que empleaba un principio de funcionamiento algo distinto. A diferencia de los motores de gasolina, que emplean una chispa para encender la mezcla de aire y combustible, los motores diésel comprimen el aire hasta tal punto que el calor generado es suficiente para encender el combustible inyectado. Algunas de las principales ventajas que ofrecen estos motores frente a los motores de gasolina son su elevada eficiencia y durabilidad y suelen emplearse en aplicaciones con una gran demanda de potencia y resistencia tales como camiones, barcos o generadores eléctricos.

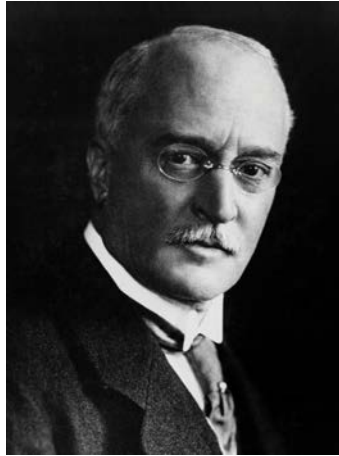


Figura 2.6 Rudolf Diesel [7].

A comienzos del siglo XX se produjo una gran proliferación y diversificación de los motores de combustión interna. Algunos innovadores como Henry Ford implementaron los motores de combustión interna en la producción en masa de automóviles consiguiendo de esta forma que los vehículos motorizados fuesen accesibles para el público general. Por otro lado, los conflictos bélicos de la Primera y la Segunda Guerra Mundial impulsaron notablemente los avances en la tecnología de los motores debido a la necesidad de vehículos militares más eficientes y fiables.

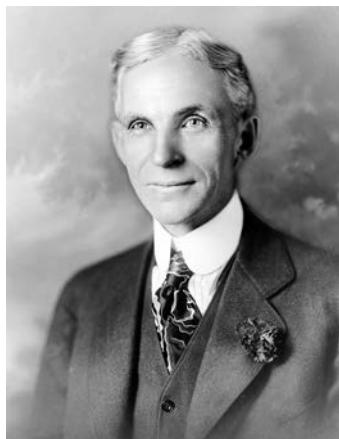


Figura 2.7 Henry Ford [8].

Finalmente, hoy en día, se puede decir que los motores de combustión interna siguen siendo una tecnología dominante, a pesar de enfrentarse a desafíos como la competencia de fuentes de energía alternativas tales como los motores eléctricos. La investigación y el desarrollo actual en materia de los motores de combustión interna se centra en mejorar la eficiencia del combustible así como en reducir las emisiones y aumentar la durabilidad de los motores.



Figura 2.8 Combustión VS Eléctrico [9].

2.2 Componentes del motor de combustión interna

Los motores de combustión interna están compuestos por una serie de componentes que trabajan de forma conjunta para conseguir transformar la energía química del combustible en energía mecánica. Cada componente desempeña un papel crucial en el funcionamiento global del motor, asegurando que el proceso de combustión sea eficiente y controlado. Se pasará ahora a comentar de manera general los componentes principales que conforman al motor de combustión interna:

- **Cilindros.** Son la parte del motor en la que se produce la combustión del combustible. Por lo general, están hechos de materiales resistentes al calor y a la presión tales como el hierro fundido o el aluminio. El número de cilindros varía atendiendo al diseño del motor en cuestión y pueden estar dispuestos en varias configuraciones según se comentará más adelante.



Figura 2.9 Cilindro [10].

- **Pistones.** Son componentes móviles que se encuentran dentro de los cilindros. Se encuentran conectados al cigüeñal por medio de las bielas. Durante el proceso de combustión, los gases generados empujan el pistón hacia abajo convirtiendo la energía de la combustión en un movimiento lineal.



Figura 2.10 Pistón [11].

- **Bielas.** Se encargan de conectar los pistones al cigüeñal y transforman el movimiento lineal de los primeros en el movimiento rotativo del segundo. Su diseño está hecho para soportar tensiones elevadas, por tanto, deben ser extremadamente resistentes a la par que ligeras.



Figura 2.11 Biela [12].

- **Cigüeñal.** Es una de las partes fundamentales del motor. Se encarga de convertir el movimiento lineal de los pistones en movimiento rotativo. Este componente suele estar hecho de materiales muy resistentes tales como el acero forjado. Normalmente, se equilibra con un alto grado de precisión con el objetivo de minimizar las vibraciones.



Figura 2.12 Cigüeñal [13].

- **Válvulas.** Regulan la entrada de la mezcla de aire y combustible en los cilindros y la salida de los gases de escape. Principalmente, existen dos tipos de válvulas: las válvulas de admisión y las válvulas de escape. Estas válvulas son controladas por un sistema de levas que garantiza su apertura y su cierre en el momento adecuado del ciclo del motor.



Figura 2.13 Válvula [14].

- **Sistema de encendido.** Es el responsable de iniciar la combustión de la mezcla de aire y combustible. Por un lado, en los motores de gasolina, esto se lleva a cabo por medio de bujías que generan una chispa eléctrica. Por otro lado, en los motores diésel, la combustión se inicia por la alta compresión del aire.



Figura 2.14 Bujía [15].

- **Sistema de combustible.** Suministra el combustible necesario para la combustión. Por un lado, en los motores de gasolina, incluye componentes como la bomba de combustible, los inyectores de combustible y el carburador o el sistema de inyección electrónica. Por otro lado, en los motores diésel, el sistema de inyección de combustible es más complejo y está diseñado para funcionar a elevadas presiones.



Figura 2.15 Carburador [16].

- **Sistema de escape.** Se encarga de expulsar los gases de combustión fuera del motor. Incluye el colector de escape, el convertidor catalítico y el silenciador. Este sistema no solo reduce las emisiones de gases contaminantes, sino que también disminuye el ruido producido por el motor.



Figura 2.16 Colector de escape [17].

- **Sistema de lubricación.** Reduce la fricción entre las partes móviles del motor, prolongando su vida útil y mejorando su eficiencia. Emplea aceite de motor que se distribuye por todas las partes móviles, creando una película lubricante que minimiza el desgaste y la fricción.
- **Sistema de refrigeración.** Mantiene la temperatura del motor dentro de un rango operativo seguro. Por lo general, emplea un radiador y un sistema de circulación de líquido refrigerante para disipar el calor generado durante la combustión. Adicionalmente, algunos motores emplean sistemas de enfriamiento por aire.

2.3 Configuraciones del motor de combustión

Los motores de combustión interna pueden presentar diversas configuraciones dependiendo de su diseño y aplicación. Cada configuración presenta sus ventajas e inconvenientes y su elección depende fundamentalmente de factores como el espacio disponible, la aplicación y los requisitos de rendimiento. Algunas de las configuraciones más comunes se presentan en la presente sección:

- **Motores en línea.** Son aquellos en los que todos sus cilindros se encuentran dispuestos en una única fila. Este tipo de configuración es frecuente en vehículos pequeños y medianos. Por un lado, sus principales ventajas son su simplicidad y su fácil mantenimiento. Por otro lado, algunos de sus principales inconvenientes son la longitud del motor y las limitaciones de potencia.



Figura 2.17 Motor en línea [18].

- **Motores en V.** Son aquellos que presentan sus cilindros dispuestos en dos filas que forman un ángulo entre sí, creando una forma de V. Este tipo de configuración es frecuente en vehículos de alto rendimiento y camiones. Por un lado, sus principales ventajas son su elevada potencia y su compactidad. Por otro lado, algunos de sus principales inconvenientes son su complejidad y su peso.



Figura 2.18 Motor en V [19].

- **Motores planos.** También conocidos como motores bóxer. Son aquellos que presentan sus cilindros dispuestos horizontalmente opuestos entre sí. Este tipo de configuración es frecuente en vehículos de alta gama y motocicletas. Por un lado, su principal ventaja es su bajo centro de gravedad, lo cual favorece la estabilidad y el manejo del vehículo. Por otro lado, algunos de sus principales inconvenientes son su complejidad y su ancho (mayor que el de otros tipos de motores).



Figura 2.19 Motor plano [19].

- **Motores rotativos.** Son aquellos que utilizan rotores en lugar de pistones. Este tipo de configuración es menos común que las anteriores, sin embargo, se encuentra en algunos vehículos deportivos. Por un lado, sus principales ventajas son su compacidad y la existencia de menos piezas móviles (reducción del desgaste y la fricción). Por otro lado, algunos de sus principales inconvenientes son su dificultad para mantener o reparar y su baja eficiencia.

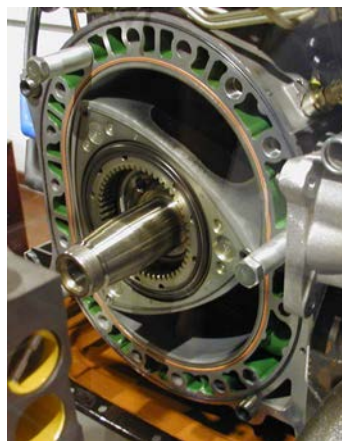


Figura 2.20 Motor rotativo [20].

- **Motores radiales.** Son aquellos en los que los cilindros se encuentran dispuestos en círculo alrededor del cigüeñal. Fueron especialmente usados en la aviación durante la primera mitad del siglo XX debido a su elevada potencia. Dado que esta configuración es la que se

corresponde con el motor modelado en el presente proyecto se ha dedicado una sección para contextualizarlo brevemente.



Figura 2.21 Motor radial [21].

2.4 El motor radial de combustión interna

El motor radial de combustión interna fue desarrollado a principios del siglo XX como una solución para la necesidad de motores potentes y fiables en aviación. En esta configuración, todos los pistones se encuentran conectados al mismo cigüeñal, el cual gira en el centro del motor. El movimiento de los pistones es controlado de manera que los cilindros se disparan en secuencia, proporcionando una potencia continua y equilibrada.

Durante la Primera y la Segunda Guerra Mundial, estos motores fueron ampliamente utilizados en aviones militares por su capacidad para generar una gran cantidad de potencia en relación con su tamaño y peso y por su capacidad de refrigeración (al encontrarse los cilindros expuestos al flujo de aire durante el vuelo). Sin embargo, su diseño complica las tareas de mantenimiento debido a la dificultad de acceder a los cilindros y otros componentes. Adicionalmente, el desarrollo de los motores de turbina (mucho más eficientes, potentes y con menores requerimientos de mantenimiento) ha provocado que desde la década de 1950 el uso de los motores radiales haya decaído considerablemente, siendo empleados casi de manera exclusiva en algunos aviones históricos o en aviones de aeromodelismo.



Figura 2.22 Avioneta de aeromodelismo con motor radial [22].

3 Software empleado. Catia V5

CATIA (computer-aided three dimensional interactive application) es un programa informático de diseño, fabricación e ingeniería asistida por ordenador comercial realizado por Dassault Systèmes. El programa está desarrollado para proporcionar apoyo desde la concepción del diseño hasta la producción y el análisis de productos [23].



Figura 3.1 Logo de CATIA [24].

La decisión de utilizar este software CAD y no cualquier otro de los que existen se ha basado principalmente en dos motivos. El primero de ellos es su amplio uso en la industria aeronáutica por la facilidad que presenta para trabajar con superficies y el segundo es la experiencia previa en el manejo de dicho software que tenemos los alumnos de ingeniería aeronáutica de esta universidad al existir asignaturas dedicadas al aprendizaje del mismo.

3.1 Mechanical Design / Part Design

En Catia V5 el módulo de **Part Design** se emplea para la creación de sólidos tridimensionales. En esta sección se van a describir las funciones de este módulo empleadas de forma más recurrente durante la realización del presente proyecto.

Funciones bidimensionales:

- **Sketch.** Esta herramienta permite diseñar perfiles bidimensionales empleados como base para el modelado 3D.

Funciones tridimensionales:

- **Rib.** Esta herramienta permite crear un sólido a partir de un perfil bidimensional cerrado indicando que siga una determinada geometría abierta de referencia.

- **Hole.** Esta herramienta permite realizar agujeros en un sólido posicionando el centro de este, así como su diámetro, acabado, roscado, etc.
- **Pad.** Esta herramienta permite realizar extrusiones partiendo de perfiles bidimensionales cerrados.
- **Pocket.** Esta herramienta permite realizar extrusiones de vaciado partiendo de perfiles bidimensionales cerrados. Es la función opuesta a **Pad**.
- **Shaft.** Esta herramienta permite crear un sólido de revolución partiendo de un perfil bidimensional cerrado.
- **Groove.** Esta herramienta permite restar un sólido de revolución partiendo de un perfil bidimensional cerrado. Es la función opuesta a **Shaft**.

3.2 Mechanical Design / Assembly Design

En Catia V5 el módulo de **Assembly Design** se emplea para la realización de un ensamblaje de piezas ya diseñadas previamente (por ejemplo, a través del módulo de Part Design) a partir de la imposición de restricciones entre ellas. En esta sección se van a describir las funciones de este módulo empleadas de forma más recurrente durante la realización del presente proyecto.

Las principales funciones presentes en este módulo son:

- **Fix.** Esta herramienta permite fijar un elemento en torno al cual se van fijando los grados de libertad del resto.
- **Offset.** Esta herramienta permite fijar la distancia entre planos de dos elementos diferentes.
- **Coincidence.** Esta herramienta permite la creación de una restricción de coincidencia entre ejes, puntos, etc.
- **Contact.** Esta herramienta permite establecer el contacto entre dos superficies siempre y cuando la zona de contacto sea un plano, una línea o un punto.
- **Fix together.** Esta herramienta permite fijar elementos entre sí.
- **Angle.** Esta herramienta permite fijar el ángulo existente entre las caras dos elementos distintos. En caso de ser un ángulo nulo se corresponde con una restricción de paralelismo.

3.3 Digital Mockup / DMU Kinematics

En Catia V5 el módulo de **DMU Kinematics** se emplea para la simulación cinemática de un mecanismo. Conviene destacar que las restricciones impuestas en este módulo interfieren con las impuestas en el módulo de **Assembly Design**, por lo que habrá que tenerlo en cuenta. En esta sección se van a describir las funciones de este módulo empleadas de forma más recurrente durante la realización del presente proyecto.

Las principales funciones presentes en este módulo son:

- **Fixed Part.** Esta herramienta permite anclar un componente para que sirva de referencia para el resto de componentes del mecanismo. A partir del uso de la misma se crea de forma automática un mecanismo.
- **Revolute Joint.** Esta herramienta permite crear restricciones de revolución entre dos componentes acoplando dos ejes entre sí así como estableciendo la distancia entre dos planos de referencia de dichos componentes.

- **Cylindrical Joint.** Esta herramienta permite crear restricciones de concentricidad entre ejes.
- **Spherical Joint.** Esta herramienta permite llevar a cabo la definición de una unión esférica entre sólidos.
- **Rigid Joint.** Esta herramienta permite definir una unión rígida entre dos componentes de tal forma que los componentes involucrados tendrán la misma cinemática (realizarán el mismo movimiento).
- **Point Surface Joint.** Esta herramienta permite establecer una unión de contacto entre un punto y una superficie.
- **Gear Joint.** Esta herramienta permite imponer una restricción de movimiento entre engranajes a partir de la definición de una relación de transmisión. Necesita de dos **Revolute Joints** que anclen el engranaje a un componente fijo.

4 Modelado y renderizado del motor

En el presente capítulo se describirán brevemente las funciones de cada una de las piezas que componen el motor así como el procedimiento que se ha seguido para llevar a cabo el modelado de las mismas. Asimismo, se adjuntará el resultado del proceso de renderizado para cada una de las piezas. Finalmente, se mostrará el resultado del montaje final de todos los componentes así como de su renderizado.

Los planos empleados para llevar a cabo el modelado de las piezas se han obtenido de CAD+Modelltechnik Jung [25]. Concretamente, la **Bill of material** del motor se compone de los siguientes elementos:

- **Drawing parts.** Se corresponden con las piezas que se van a modelar. Son aquellas que incluyen planos con las diferentes vistas que proporcionan la información necesaria para realizar su modelado.
- **Standard parts.** Se corresponden con las piezas que se fabrican de acuerdo a normas específicas. Estas piezas se modelan buscando la información correspondiente en la norma asociada que se indica en la BOM.
- **Company parts.** Se corresponden con las piezas que han sido fabricadas por empresas especializadas. En ocasiones, el fabricante proporciona información acerca de las piezas que permite llevar a cabo su modelado adecuadamente. Además, existen muchos casos en los que los propios fabricantes ofrecen el modelo 3D de la pieza correspondiente. Sin embargo, existen algunos casos en los que dicha información no es pública.

5-cylinder-radialengine, 82 ccm

bill of materials

part-no.	pcs.		dimensions			material	remark, standardize, supplier
			A	B	L		
01	5	inlet manifold	∅	10 x 0.5 x	170	high-grade steel pipe	according drawing
02	5	exhaust manifold	∅	10 x 0.5 x	82	high-grade steel pipe	according drawing
03	2	washer for master rod	∅	19 x	0.8	brass	according drawing
04		not to apply					
05	1	washer 1	∅	42 x	0.5	Al-Cu-Mg-Pb; F 35-38	according drawing
06	1	washer 2	∅	42 x	0.5	Al-Cu-Mg-Pb; F 35-38	according drawing
07	10	adjusting screw, valve clearance	M	4 x		steel	standard part, adapt according to drawing
08	10	spring plate	∅	9.5 x	1.5	silver steel	according drawing
09	5	glow plug				steel	modeling specialist shop
10	5	washer for glow plug				copper	modeling specialist shop
11	1	master rod	∅	10 x 14 x	96.2	Al-Mg-Si 0.5; F22	according drawing
12	10	bell crank		8 x 7 x	35.5	silver steel	valve side hardened
13	5	bell crank support		15.4 x 10 x	46.2	Al-Cu-Mg-Pb; F 35-38	according drawing
14	5	bell crank shaft	∅	4 x	15.5	silver steel	according drawing
15	1	chuck cone for propeller driver	∅	15 x		brass	according drawing
16	5	piston	∅	29 x	22	Al-Mg-Si 0.5; F22	according drawing
17	5	piston pin	∅	7 x	26	steel, S160, hardening	according drawing
17a	10	piston pin cap	∅	7 x		brass	according drawing
18	5	piston ring	∅	30.1 x	1.5	steel, C45	according drawing
19	1	crank case	∅	100 x	58	Al-Cu-Mg-Pb; F 35-38	according drawing
20	1	crank	∅	78 x	130.5	steel, C45	according drawing
21	1	bearing, 6001-2RS	∅	12 x 28 x	8	steel	company Techpro
22	1	bearing, 6003-2RS	∅	17 x 35 x	10	steel	company Techpro
23	1	bearing, double-row, 4202B-TVH	∅	15 x 35 x	14	steel	company INA
24	1	bush	∅	9.5 x	13	brass	according drawing
25	1	needle bearing NA4901	∅	10 x 22 x	13	steel	with inside bush, 15 mm long
26	3	hexagon socket set screw	M	3 x		steel, 10.8	DIN 914
27	1	assembly flange	∅	130 x	55	Al-Cu-Mg-Pb; F 35-38	according drawing
28	10	nut	M	4		steel, galvanized	DIN 934
29	1	cam rod gear, 60 teeth, modul 1	∅	75.8 x	5	steel, C45	order-no. 224 460 00
30	1	cam rod	∅	75.8 x	14	steel, C45	according drawing
31	1	cam rod housing	∅	100 x	46.5	Al-Cu-Mg-Pb; F 35-38	according drawing
32	5	c-ring	∅	9.5 x 1.3		nubor	standard part
33	4	link rod	∅	13 x 7 x	56.5	Al-Mg-Si 0.5; F22	DIN 3771
34	4	rod bolt	∅	7 x	14	steel, S160, hardening	according drawing
35	1	propeller driver	∅	40 x	13	Al-Cu-Mg-Pb; F 35-38	according drawing
36	1	suction housing cap	∅	100 x	37	Al-Cu-Mg-Pb; F 35-38	according drawing
37	4	socket screw	M	2.5 x	10	steel, 8.8	standard part
38	4	socket screw	M	3 x	8	steel, 8.8	DIN 912
39	10	socket screw	M	3 x	12	steel, 8.8	DIN 912

bill of materials, (C) by V. Jung - 1 - www.cad-mode/technik-jung.de

Figura 4.1 Bill of material 1.

5-cylinder-radialengine, 82 ccm

bill of materials

part-no.	pcs.		dimensions			material	remark, standardize, supplier
			A	B	L		
40	45	socket screw	M	4 x	12	steel, 8.8	DIN 912
41	5	socket screw	M	4 x	25	steel, 8.8	DIN 912
42	5	socket screw	M	4 x	30	steel, 8.8	DIN 912
43	2	countersunk socket screw	M	3 x	6	steel, 8.8	DIN 7991
44		not to apply					
45	1	spinner	∅	40 x	35	Al-Cu-Mg-Pb; F 35-38	according drawing
46	10	cam follower	∅	4 x	17	steel, S160	DIN 6325
47	10	slide guiding	∅	6 x	11	red brass	according drawing
48	10	push rod	∅	1.5 x	64	spring steel wire	adapt length
49	10	valve	∅	11.5 x	28.5	high-grade steel, X15Cr12	according drawing
50	10	valve spring	∅	8.8 x 0.8 x	14.5	spring steel	order-no. D-123
51	10	valve cap	∅	13 x	21.5	red brass	according drawing
52	1	carburetor				steel	for 10 ccm 2-stroke engine
53	10	screw connection	WS	12 x	13	steel	according drawing
54	1	shaft locking clip, 15 mm				spring steel	DIN 471
54a	20	shaft locking clip shim, 3mm				spring steel	DIN 6799
55	10	shaft locking clip shim, 4mm				spring steel	DIN 6799
56	1	shaft locking clip shim, 10mm				spring steel	DIN 6799
57	1	gear, 15 teeth, modul 1				5 steel, 95mn28K	order-no. 214 015 00
58	1	gear, 22 teeth, modul 1				5 steel, 95mn28K	order-no. 214 022 00
59	1	gear crank, 22 teeth, modul 1				10 steel, S160	company Mädlar, adapt according to drawing
60	1	intermediate shaft	∅	6 x	22	steel, S160	order-no. 214 022 00
61	5	cylinder		50 x 50 x	40.4	Al-Cu-Mg-Pb; F 35-38	DIN 6325
62	5	cylinder head	∅	50 x	24	Al-Cu-Mg-Pb; F 35-38	according drawing
63	5	cylinder head gasket	∅	34 x 29 x	0.2	Al-sheet	modeling specialist shop
64	5	cylinder liner	∅	34 x	47	ductile graphite iron	according drawing
sum	333						

definition:
WS = wrench size
M = metric thread
DIN = german industry standard

bill of materials, (C) by V. Jung - 2 - www.cad-mode/technik-jung.de

Figura 4.2 Bill of material 2.

4.1 Modelado y renderizado de las Drawing Parts

4.1.1 Part 01. Inlet manifold

La principal función del colector de admisión es la de permitir la correcta y fluida entrada de aire a cada uno de los cilindros del motor.

Para su modelado en Catia V5 se ha empleado la herramienta **Rib** a través de la cual, partiendo de un **Sketch** con la sección transversal de la tubería, se extruye siguiendo una curva guía previamente diseñada (eje de la tubería).

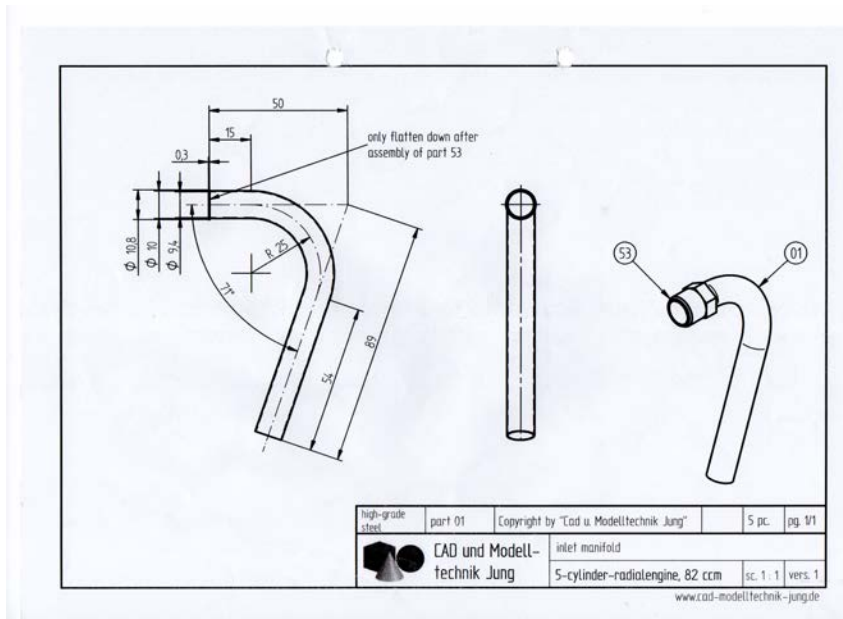


Figura 4.3 Plano Part 01.

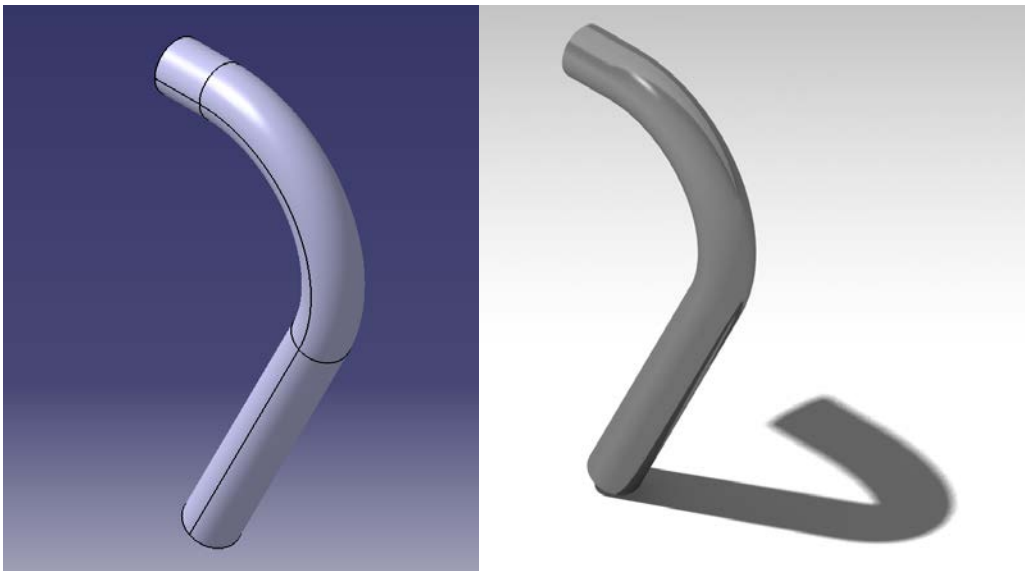


Figura 4.4 Modelo Part 01 en Catia V5.

4.1.2 Part 02. Exhaust manifold

La función del colector de escape es la de expulsar a la atmósfera los gases producidos durante la combustión.

Para su modelado en Catia V5 se ha empleado un proceso completamente análogo al comentado previamente en el colector de admisión.

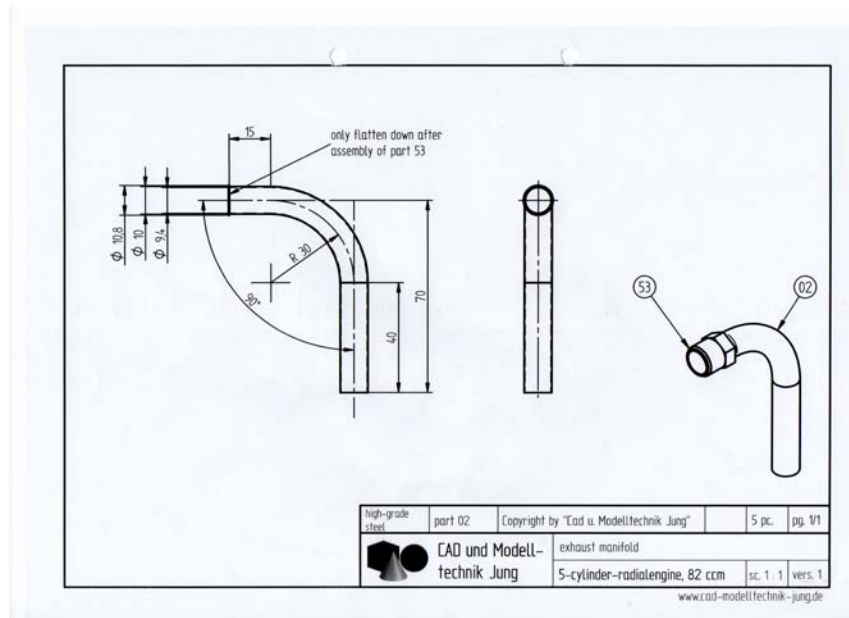


Figura 4.5 Plano Part 02.

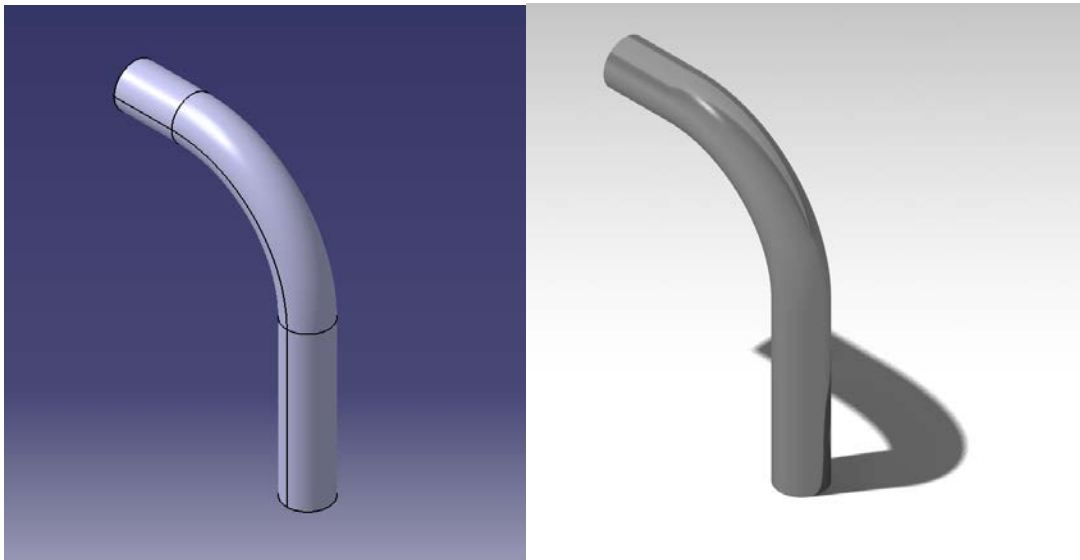


Figura 4.6 Modelo Part 02 en Catia V5.

4.1.3 Part 03. Washer for master rod

La función de la arandela para la biela maestra es la de evitar el roce entre la biela maestra y el cigüeñal.

Para su modelado en Catia V5 se ha empleado la herramienta **Pad** a través de la cual, partiendo de un **Sketch** con la sección del anillo, se extruye siguiendo el eje indicado.

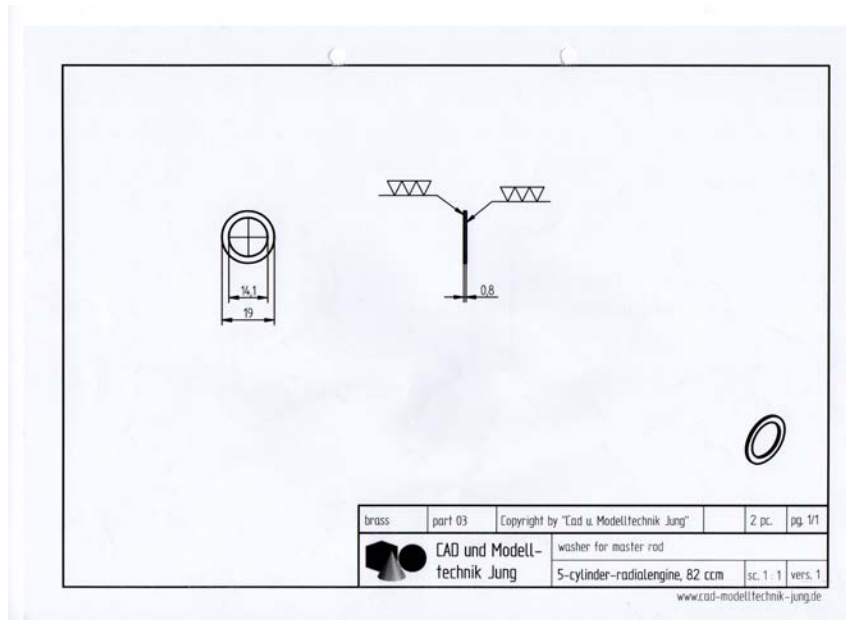


Figura 4.7 Plano Part 03.

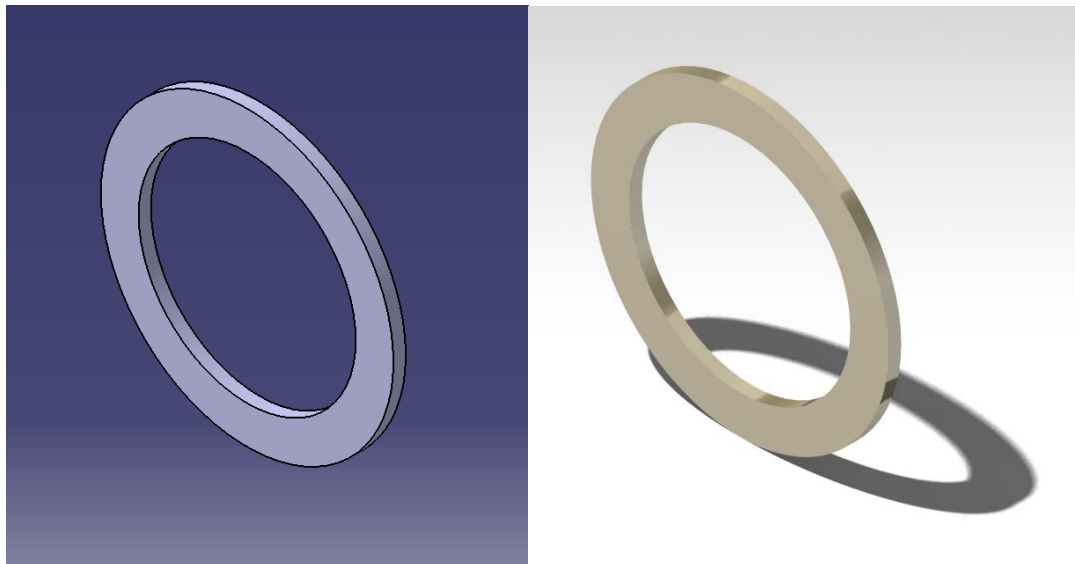


Figura 4.8 Modelo Part 03 en Catia V5.

4.1.4 Part 05. Washer 1

La función de la arandela 1 es la de dar cohesión a la unión de la biela maestra con las bieletas. Para su modelado en Catia V5 se ha empleado un proceso completamente análogo al de la arandela para la biela maestra. Sin embargo, en este caso, al existir 2 agujeros en la arandela, ha sido necesario emplear la orden **Hole** a través de la cual se posicionan los agujeros que se desean realizar y se indica su diámetro.

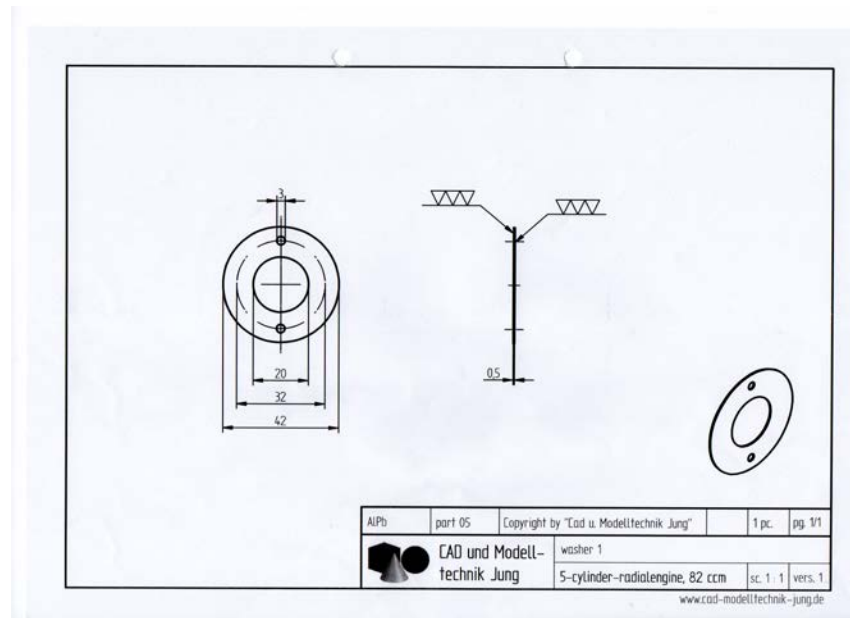


Figura 4.9 Plano Part 05.

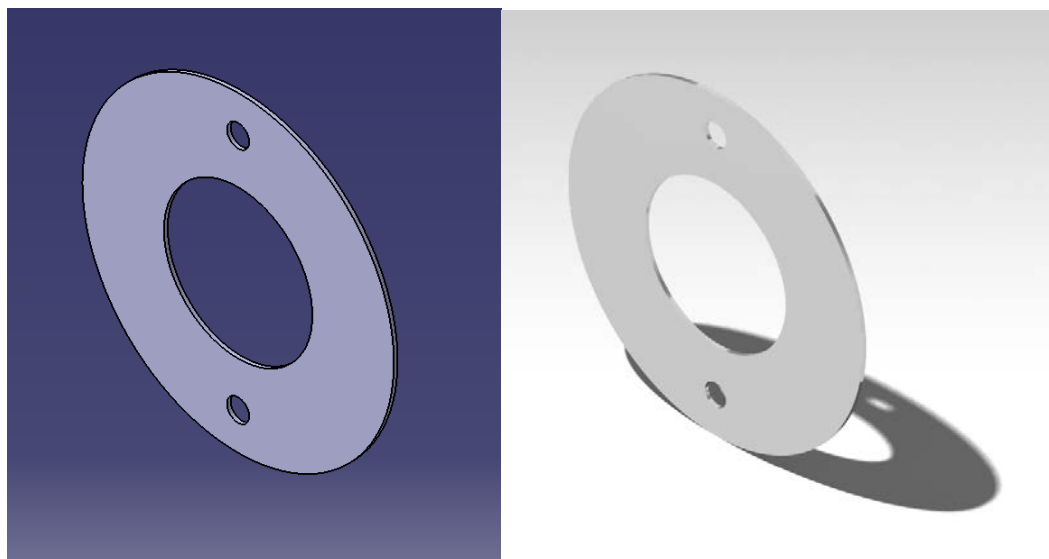


Figura 4.10 Modelo Part 05 en Catia V5.

4.1.5 Part 06. Washer 2

La función de la arandela 2 es la de dar cohesión a la unión de la biela maestra con las bieletas. Para su modelado en Catia V5 se ha empleado un proceso completamente análogo al de la arandela 1.

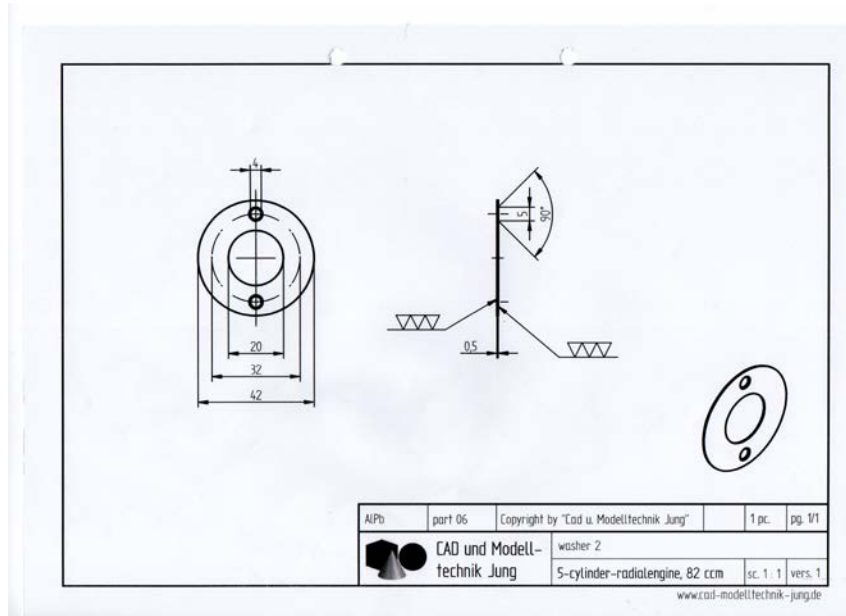


Figura 4.11 Plano Part 06.

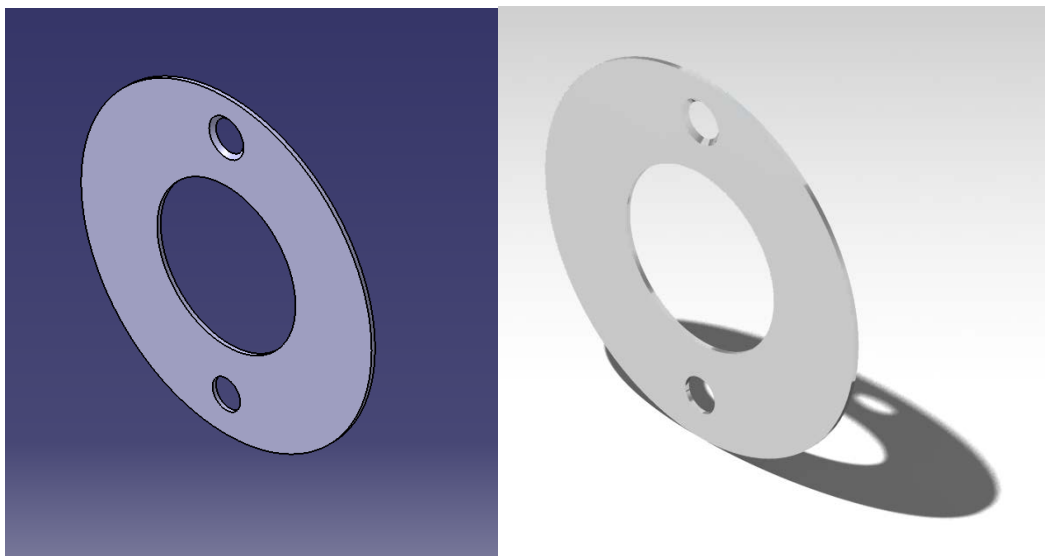


Figura 4.12 Modelo Part 06 en Catia V5.

4.1.6 Part 08. Spring plate

La función de la placa del resorte es la de permitir el contacto entre el balancín y el resorte de las válvulas de admisión y escape.

Para su modelado en Catia V5 se ha empleado la herramienta **Shaft** a través de la cual, partiendo de un **Sketch** con la sección a revolucionar, se revoluciona a través de un eje a seleccionar. Finalmente, se han realizado dos vaciados por extrusión con la orden **Pocket**.

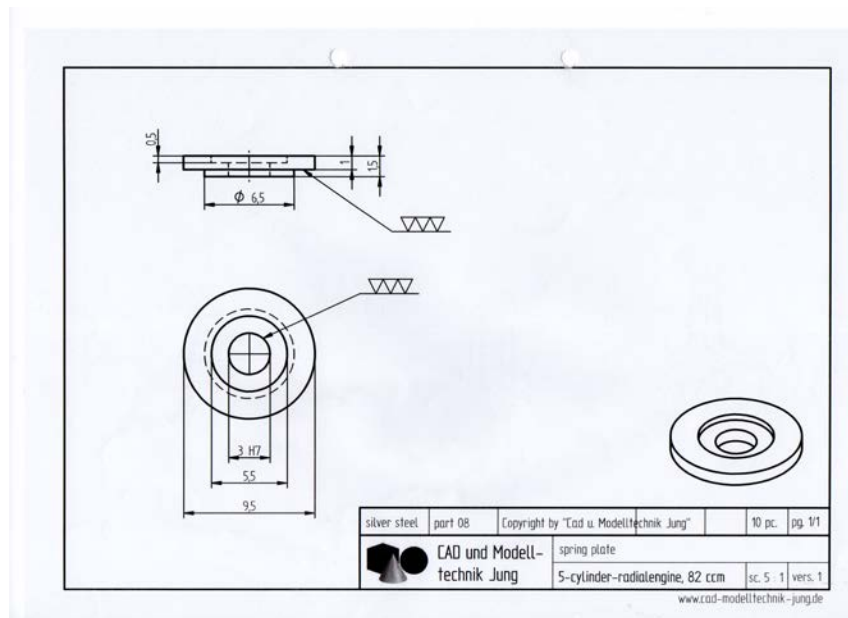


Figura 4.13 Plano Part 08.

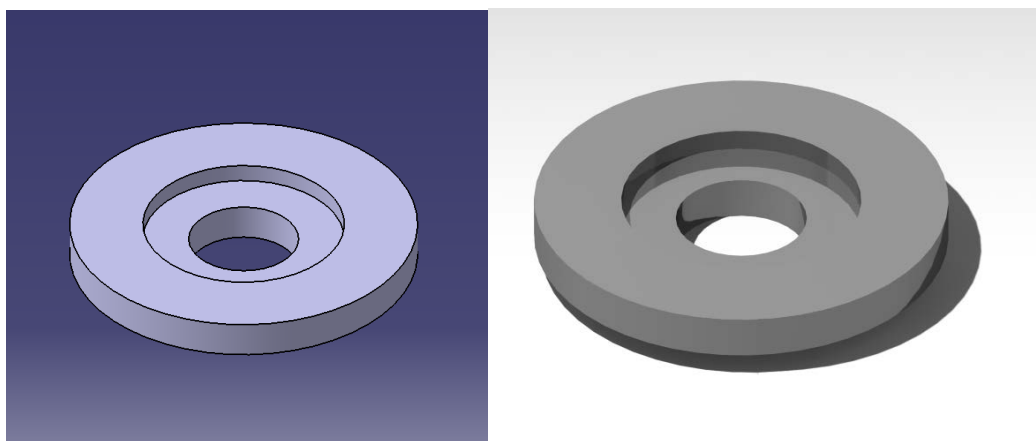


Figura 4.14 Modelo Part 08 en Catia V5.

4.1.7 Part 11. Master rod

La biela maestra se encarga de conectar el pistón principal con el cigüeñal asegurando la transmisión de fuerzas entre ambos elementos.

Para su modelado en Catia V5 se han utilizado las herramientas de **Pad**, **Hole** y **Pocket** que nos permiten extruir, realizar agujeros y realizar extrusiones de vaciado respectivamente, todas ellas partiendo de un **Sketch**. Así como la herramienta de redondeado de esquinas **EdgeFillet** para suavizar los bordes de la pieza.

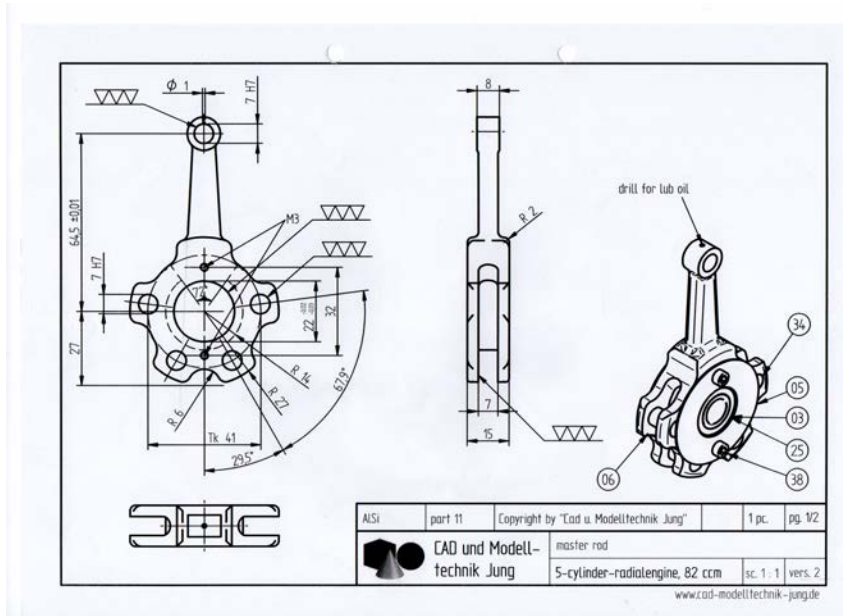


Figura 4.15 Plano Part 11.

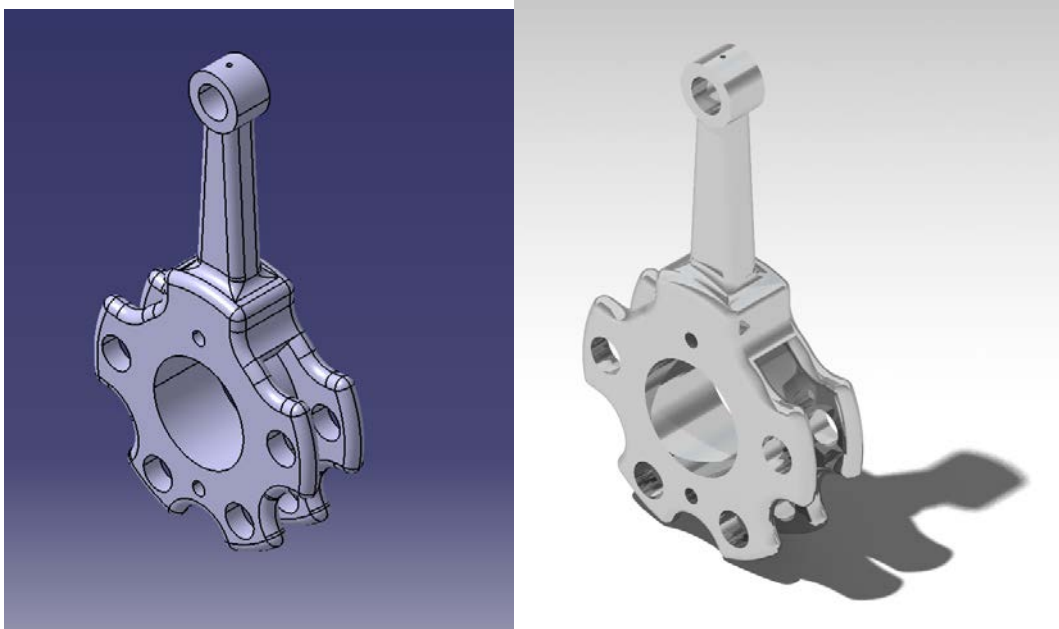


Figura 4.16 Modelo Part 11 en Catia V5.

4.1.8 Part 12. Bell crank

La función de los balancines es la de abrir/cerrar las válvulas de admisión y escape sincronizando su movimiento con el de los platos de levas.

Para su modelado en Catia V5 se ha empleado la herramienta **Pad** para realizar la extrusión del **Sketch** asociado a la pieza y, posteriormente, se ha empleado la herramienta **Hole** para realizar los agujeros correspondientes. Finalmente, para realizar el achaflanado del agujero se ha empleado la herramienta **Chamfer**.

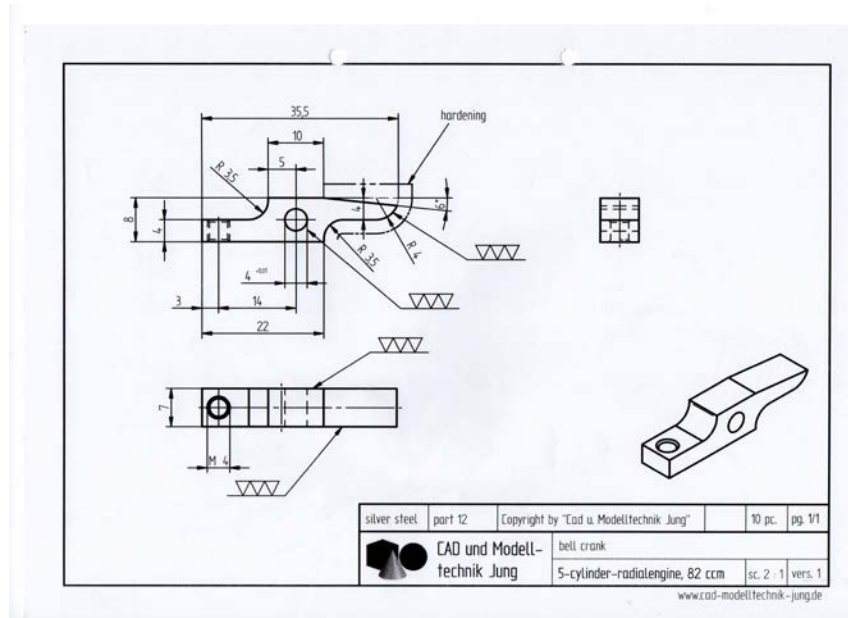


Figura 4.17 Plano Part 12.

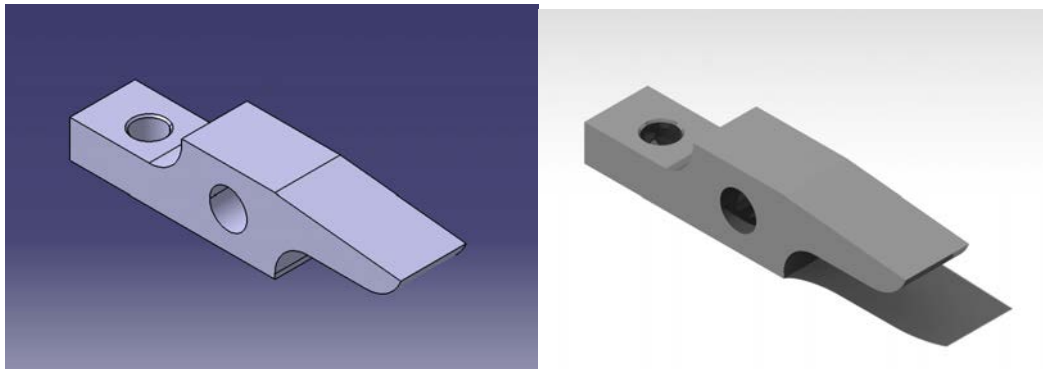


Figura 4.18 Modelo Part 12 en Catia V5.

4.1.9 Part 13. Bell crank support

Las funciones del soporte para los balancines son la de servir de alojamiento para los balancines y de unión con la culata.

Para su modelado en Catia V5 se ha empleado la herramienta **Pad** para realizar la extrusión del **Sketch** asociado a la pieza y, posteriormente, se ha empleado la herramienta **Hole** para realizar los agujeros correspondientes. Finalmente, para la realización de los chaflanes se ha empleado la herramienta **Chamfer**.

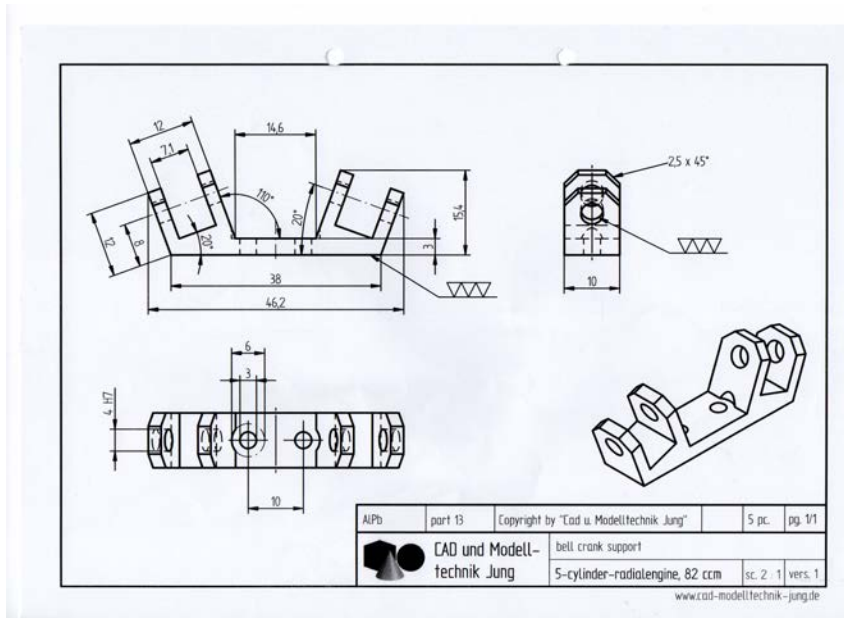


Figura 4.19 Plano Part 13.

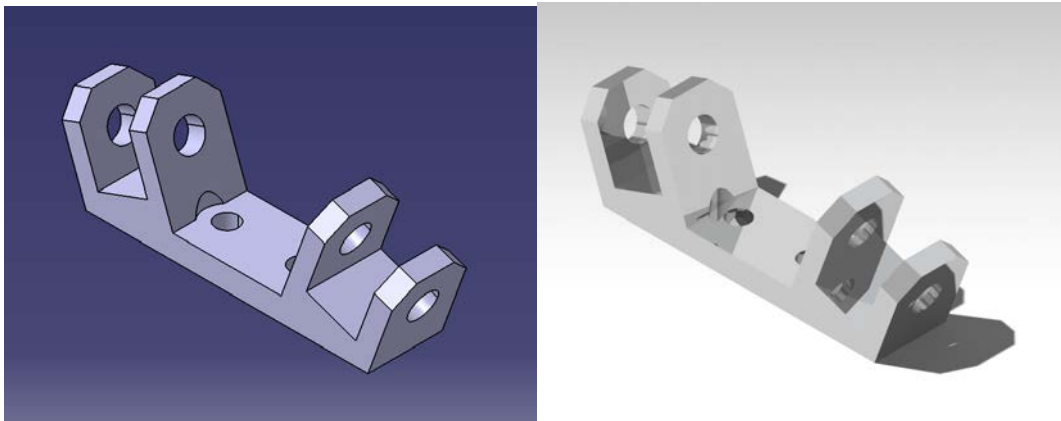


Figura 4.20 Modelo Part 13 en Catia V5.

4.1.10 Part 14. Bell crank shaft

La función de los ejes de los balancines es la de permitir el giro de los mismos con el objetivo de transmitir el movimiento de los platos de levas a las válvulas.

Para su modelado en Catia V5 se ha empleado la herramienta **Pad** para realizar la extrusión del **Sketch** asociado y, posteriormente, se han realizado dos vaciados por revolución a través de la herramienta **Groove**.

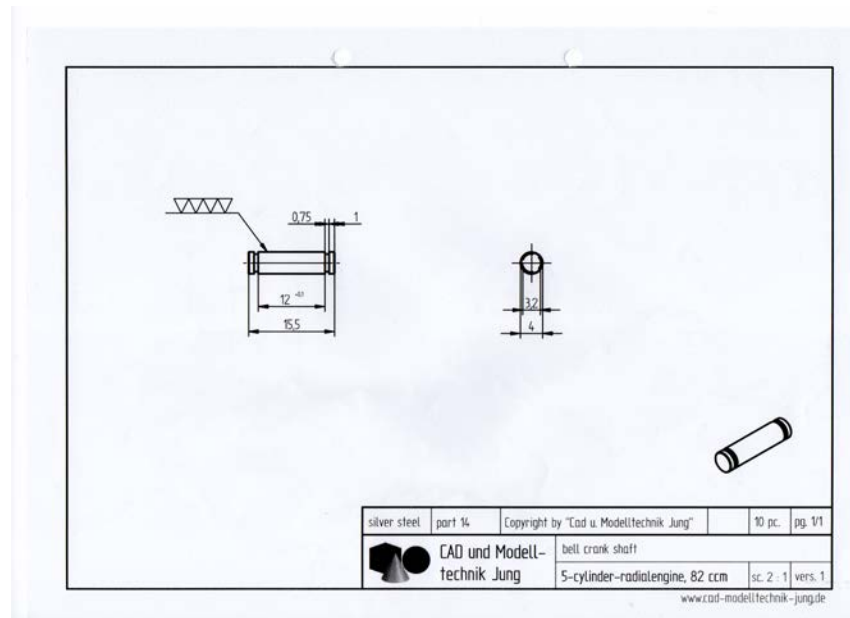


Figura 4.21 Plano Part 14.

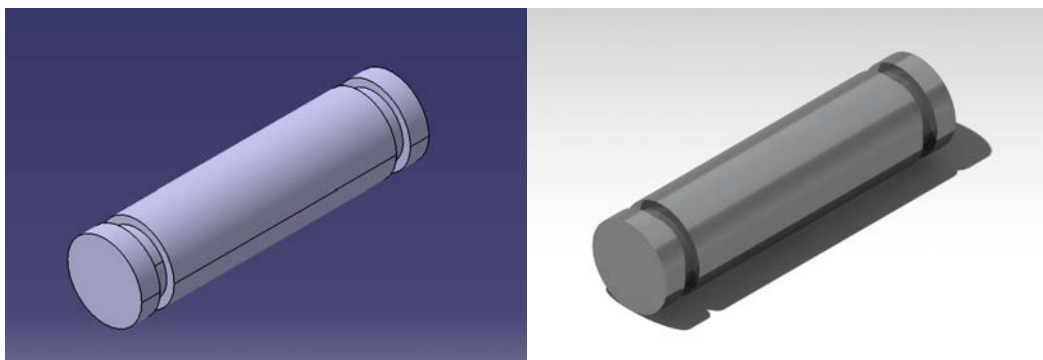


Figura 4.22 Modelo Part 14 en Catia V5.

4.1.11 Part 15. Chuck cone for propeller driver

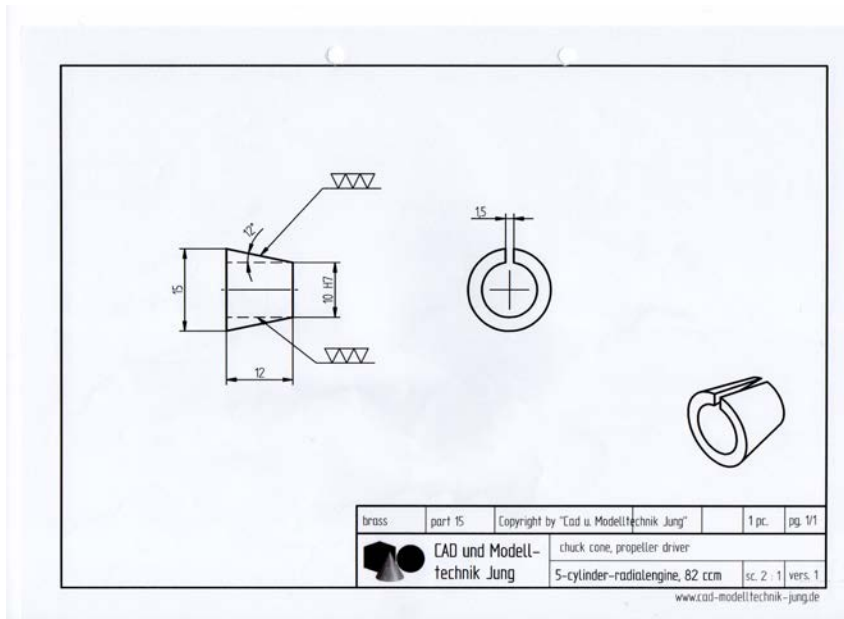


Figura 4.23 Plano Part 15.

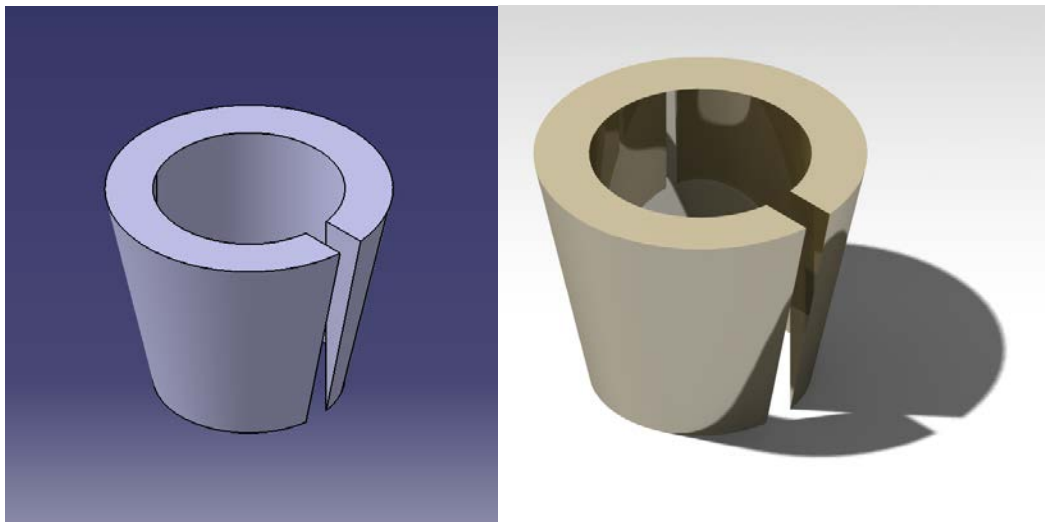


Figura 4.24 Modelo Part 15 en Catia V5.

4.1.12 Part 16. Piston

La función del pistón es la de transmitir la fuerza del motor al cigüeñal a través de la biela a la que va unido.

Para su modelado en Catia V5 se ha empleado una combinación de las herramientas **Shaft** y **Pocket** con los **Sketch** correspondientes en cada caso, alcanzando el resultado que se aprecia en las imágenes adjuntas.

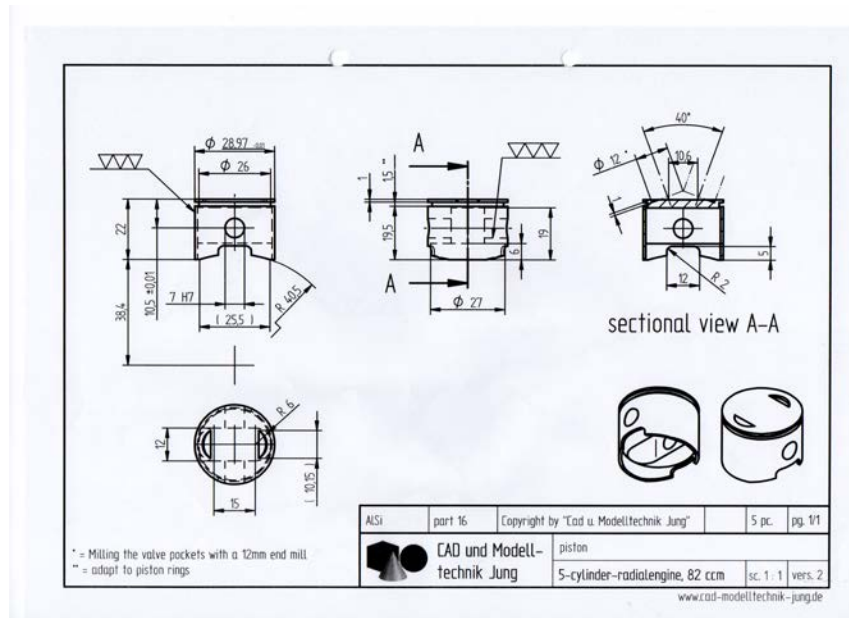


Figura 4.25 Plano Part 16.

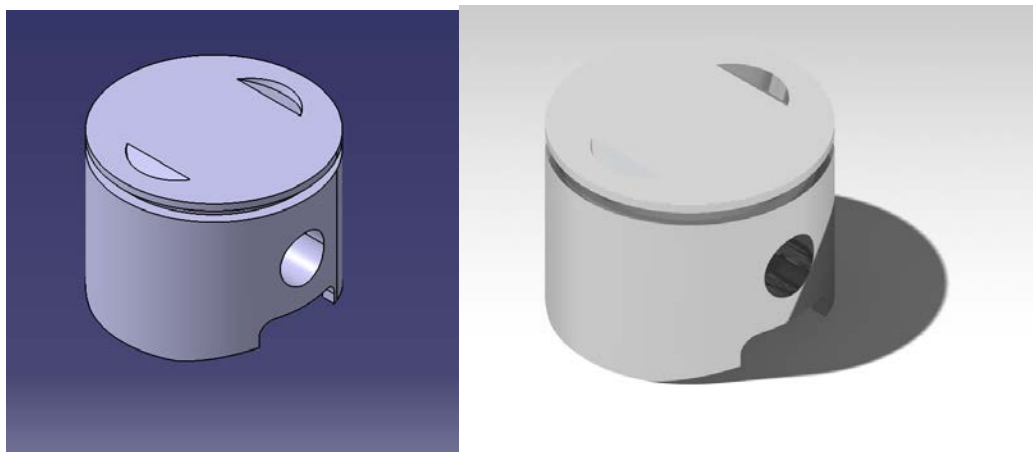


Figura 4.26 Modelo Part 16 en Catia V5.

4.1.13 Part 17. Piston pin

La función del pasador del pistón es la de unir el pistón a la biela correspondiente.

Para su modelado en Catia V5 se ha empleado la herramienta **Pad** que permite extruir el **Sketch** asociado. Además, para realizar el achaflanado de las bases, se ha empleado la herramienta **Chamfer**.

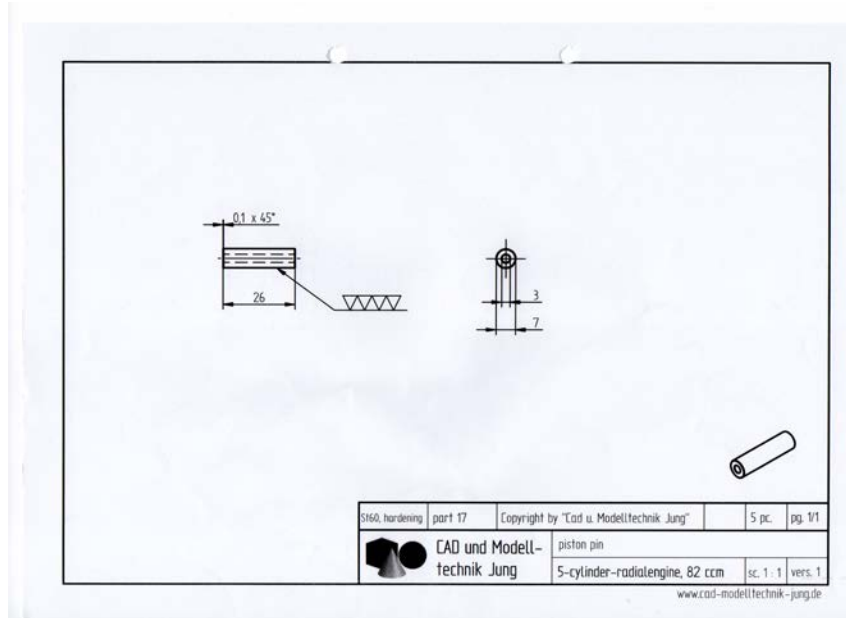


Figura 4.27 Plano Part 17.

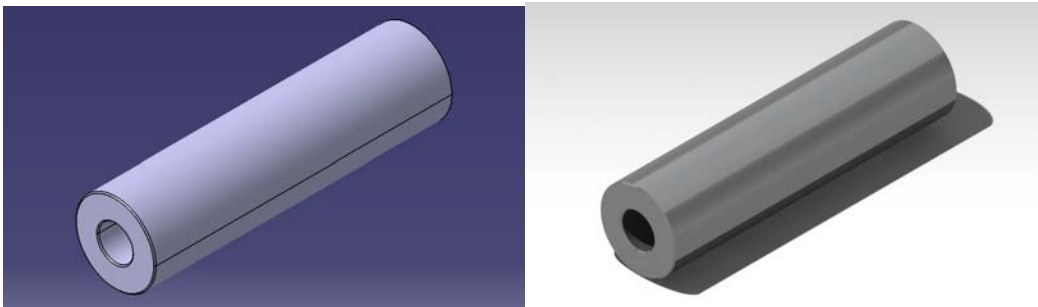


Figura 4.28 Modelo Part 17 en Catia V5.

4.1.14 Part 17a. Piston pin cap

La función de la tapa del pasador del pistón es la de asegurar el cierre entre el pasador y el pistón reforzando la unión con la biela.

Para su modelado en Catia V5 se ha empleado la herramienta **Shaft** para realizar la revolución del **Sketch** asociado. Además, para realizar el achaflanado de la base, se ha empleado la herramienta **Chamfer**.

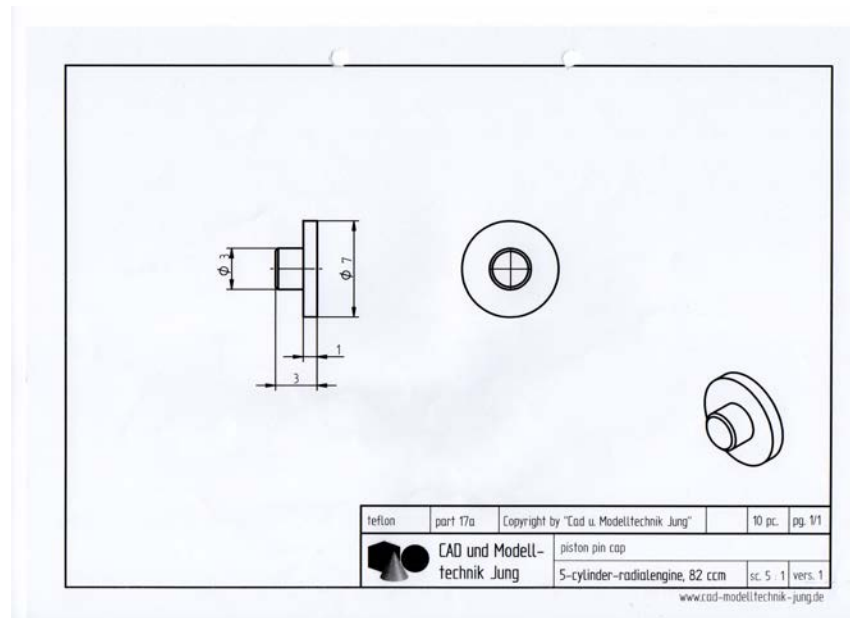


Figura 4.29 Plano Part 17a.

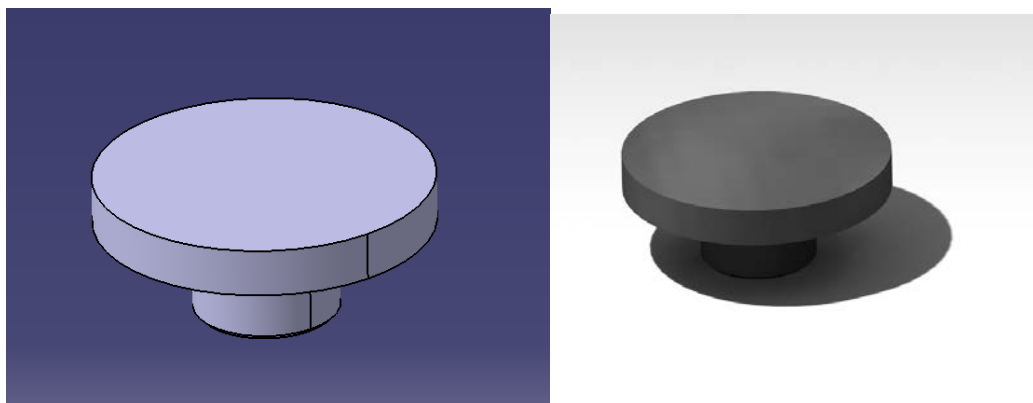


Figura 4.30 Modelo Part 17a en Catia V5.

4.1.15 Part 18. Piston ring

Los anillos del pistón se encargan de sellar el espacio entre el pistón y la camisa del cilindro evitando el escape de los gases de combustión, asegurando la máxima eficiencia del motor.

Para su modelado en Catia V5 se ha empleado la herramienta **Pad** para realizar la extrusión del **Sketch** asociado.

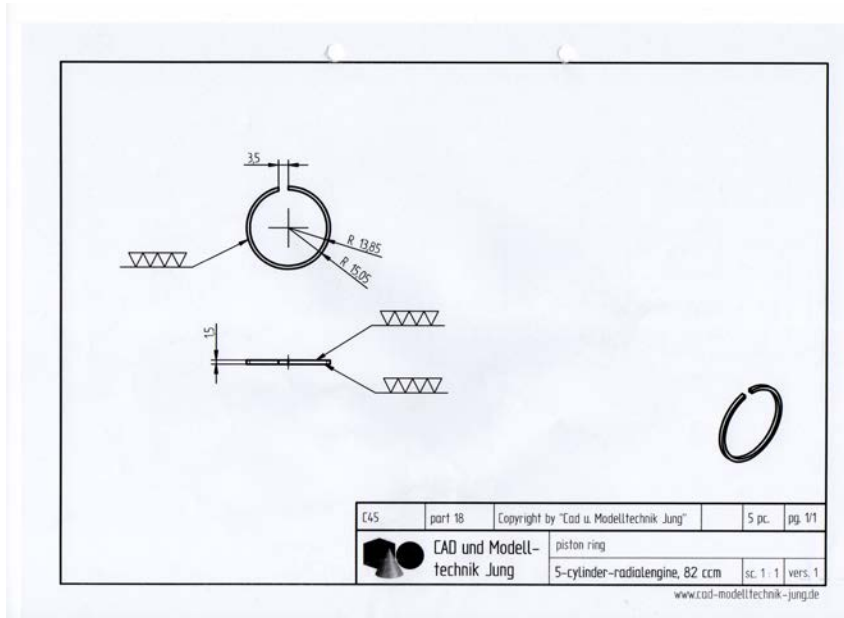


Figura 4.31 Plano Part 18.

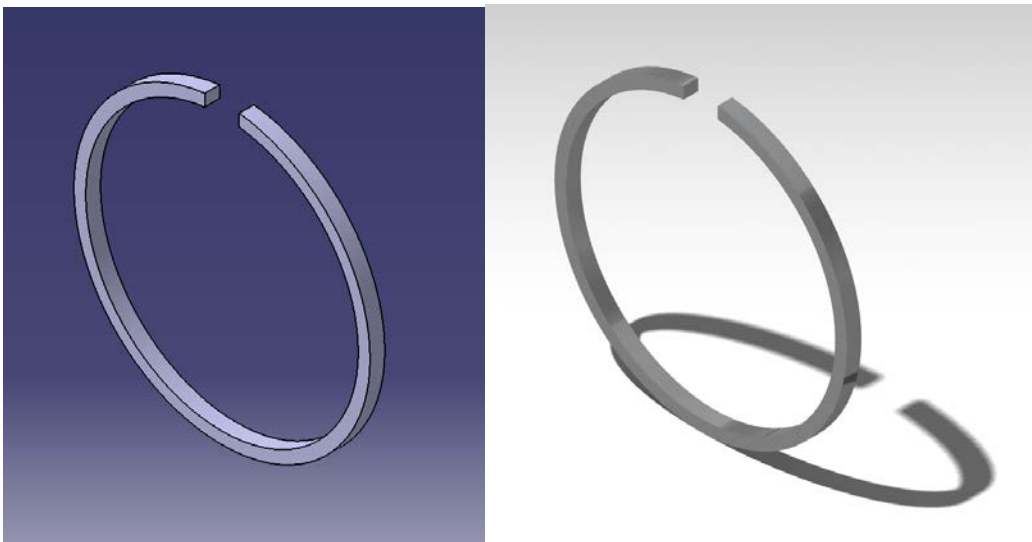


Figura 4.32 Modelo Part 18 en Catia V5.

4.1.16 Part 19. Crank case

Las principales funciones del bloque motor son la de servir de soporte para los cilindros y la de alinear el movimiento de los pistones y el cigüeñal conformando de esta forma la estructura básica del motor.

Para su modelado en Catia V5 se han utilizado las herramientas de **Pad**, **Hole** y **Pocket** que nos permiten extruir, realizar agujeros y realizar extrusiones de vaciado respectivamente, todas ellas partiendo de un **Sketch**.

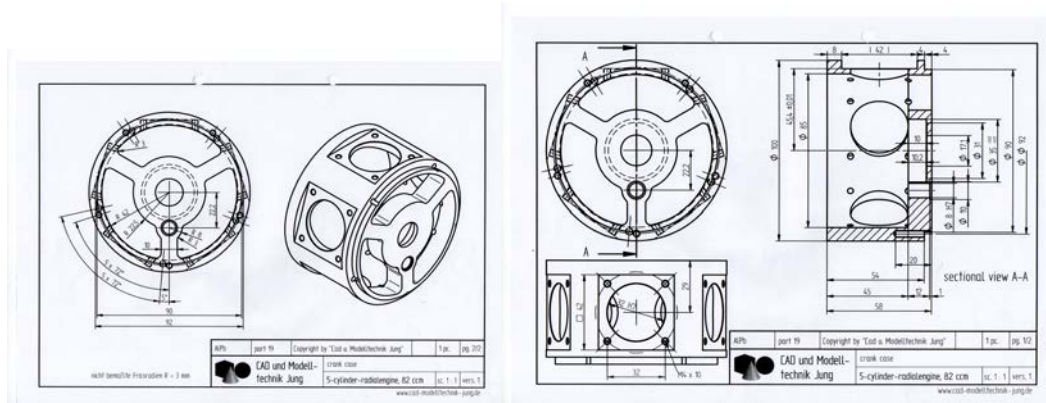


Figura 4.33 Planos Part 19.

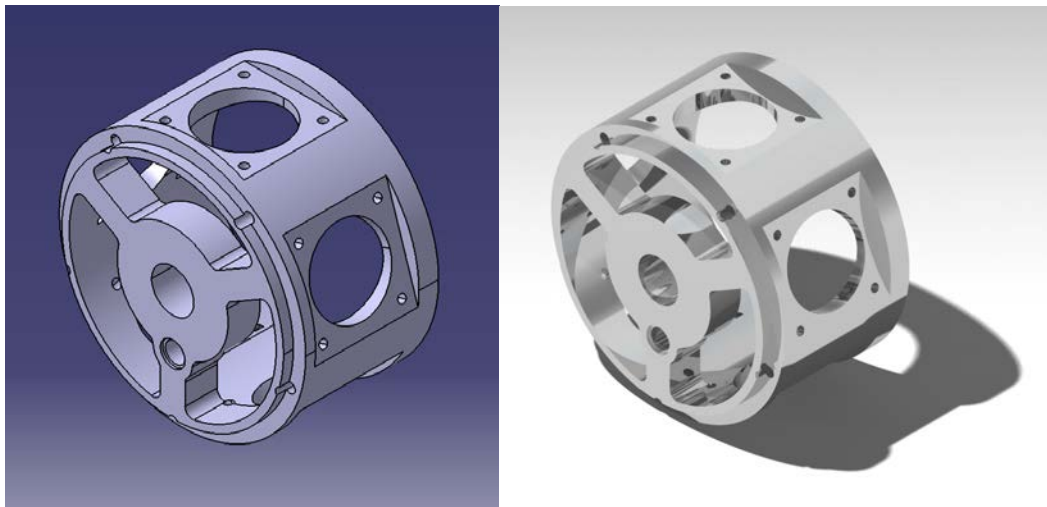


Figura 4.34 Modelo Part 19 en Catia V5.

4.1.17 Part 20. Crank

La función principal de un cigüeñal en este tipo de motores es la de convertir el movimiento lineal de los pistones en un movimiento rotativo con el objetivo de propulsar la avioneta en la que va montado el motor.

Para su modelado en Catia V5 se han utilizado las herramientas de **Pad**, **Shaft**, **Groove** y **Pocket** que nos permiten extruir, realizar sólidos por revolución, vaciar sólidos por revolución y realizar extrusiones de vaciado respectivamente, todas ellas partiendo de un **Sketch**.

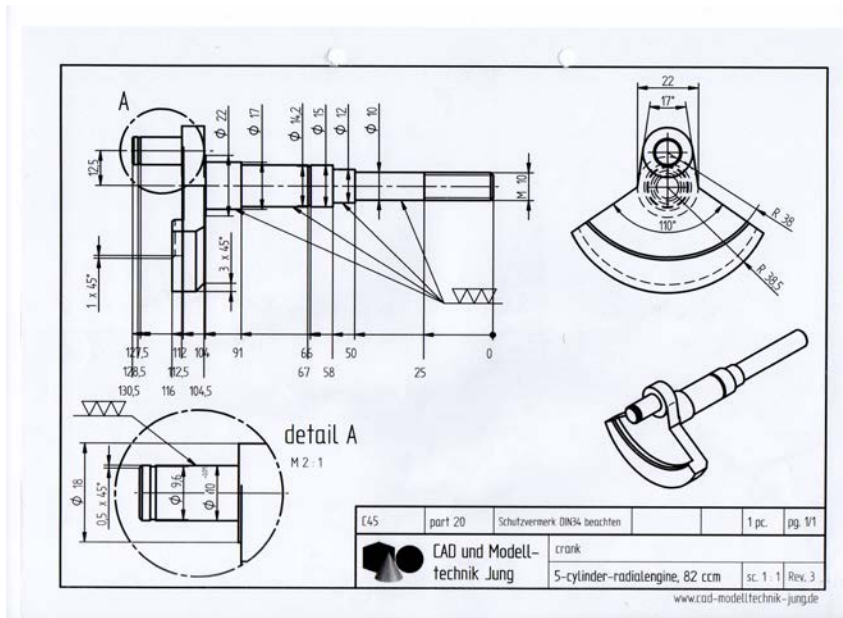


Figura 4.35 Plano Part 20.

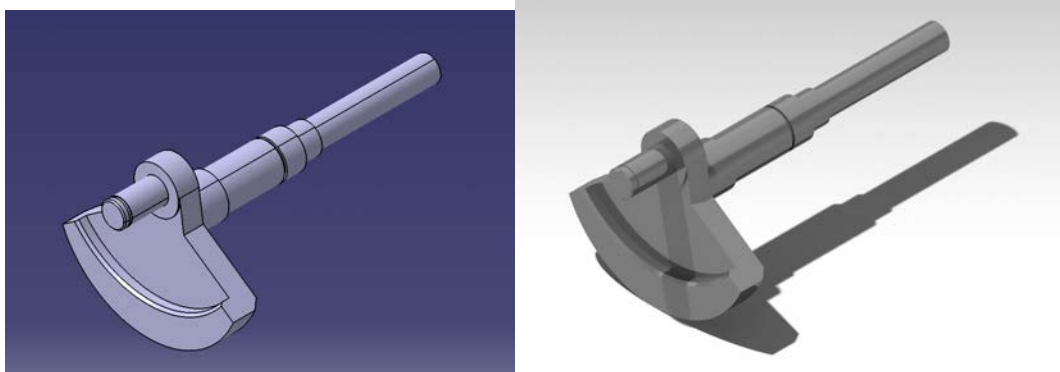


Figura 4.36 Modelo Part 20 en Catia V5.

4.1.18 Part 24. Bush

El objetivo del presente casquillo es el de minimizar la fricción existente entre los seguidores de las levas y los alojamientos de las mismas.

Para su modelado en Catia V5 se han empleado las órdenes **Shaft** y **Pocket** para crear un sólido por revolución y llevar a cabo un vaciado por extrusión a partir de un **Sketch**, respectivamente. Finalmente, para el achaflanado de la base se ha utilizado la herramienta **Chamfer**.

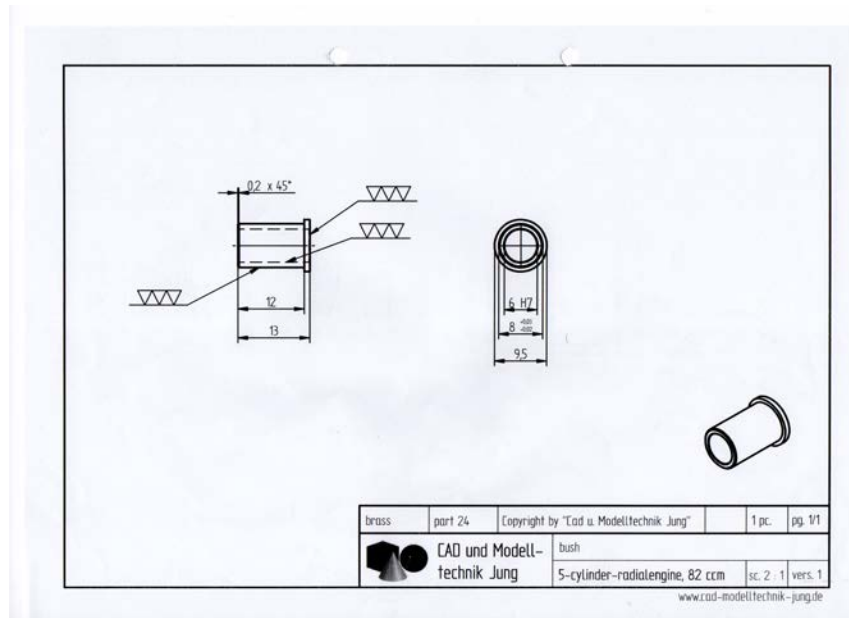


Figura 4.37 Plano Part 24.

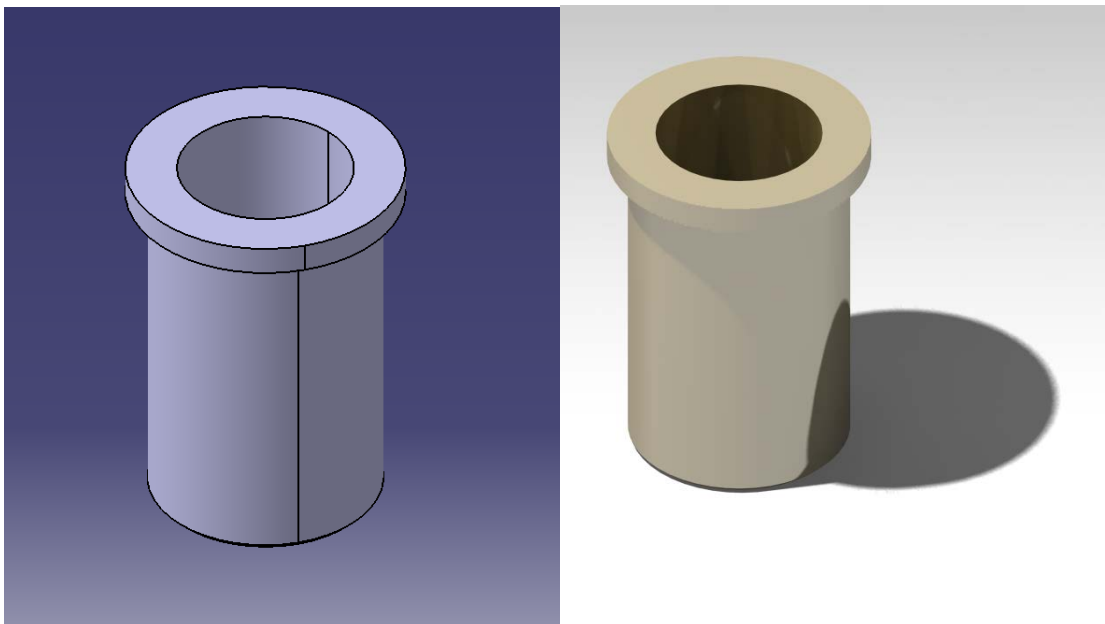


Figura 4.38 Modelo Part 24 en Catia V5.

4.1.19 Part 27. Assembly flange

La principal función de la brida de montaje es la de realizar la unión estructural del motor a la avioneta.

Para su modelado en Catia V5 se han utilizado las herramientas de **Shaft** y **Pocket** que nos permiten realizar sólidos de revolución y realizar extrusiones de vaciado respectivamente, todas ellas partiendo de un **Sketch**. Finalmente, la herramienta **CircPattern** se ha empleado para realizar la reproducción del patrón circular de los vaciados por extrusión.

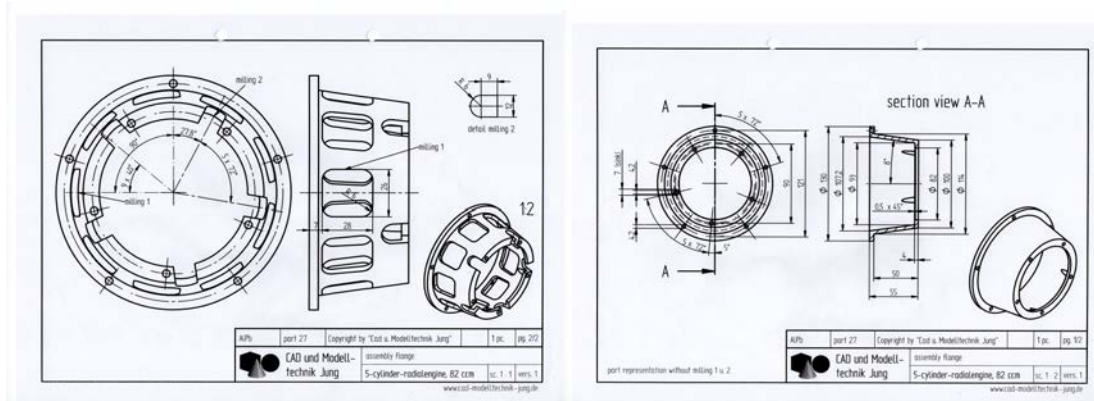


Figura 4.39 Planos Part 27.

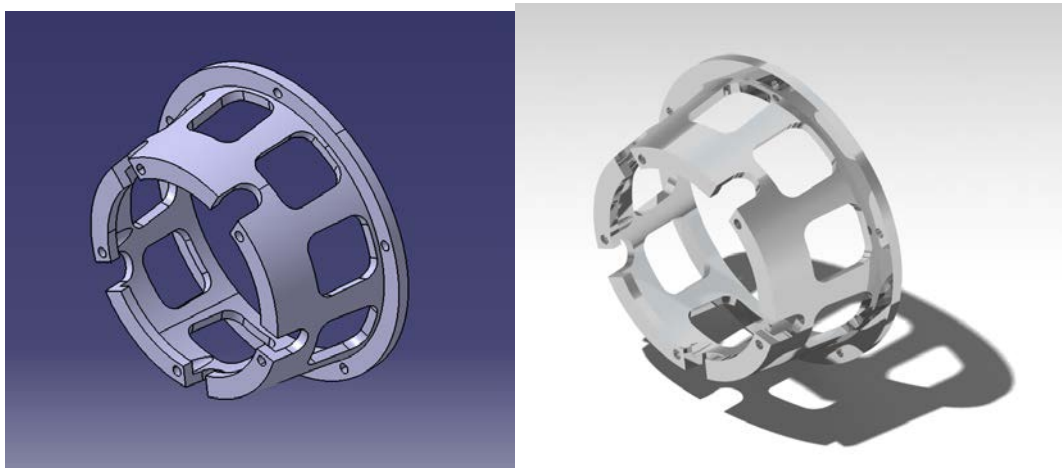


Figura 4.40 Modelo Part 27 en Catia V5.

4.1.20 Part 29. Cam rod gear, 60 teeth, modul 1

La principal función del engranaje del plato de levas de admisión es conseguir acoplar el movimiento de giro del cigüeñal con el de subida y bajada de los balancines que controlan las válvulas de admisión.

Para su modelado en Catia V5 se han utilizado las herramientas de **Pad** y **Pocket** que nos permiten realizar extrusiones y extrusiones de vaciado respectivamente, ambas partiendo de un **Sketch**. Finalmente, la herramienta **CircPattern** se ha empleado para realizar la reproducción del patrón circular de los vaciados por extrusión necesarios para la realización de los dientes.

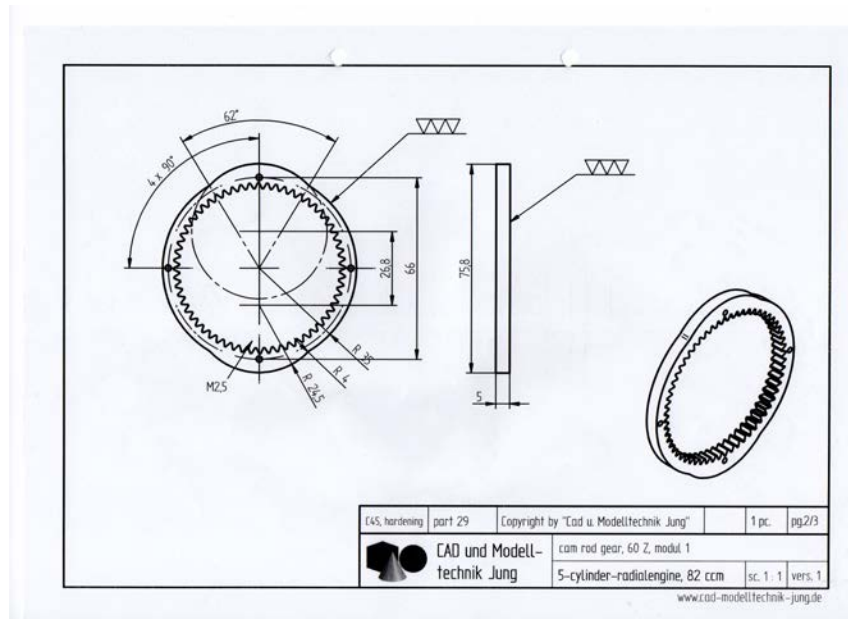


Figura 4.41 Plano Part 29.

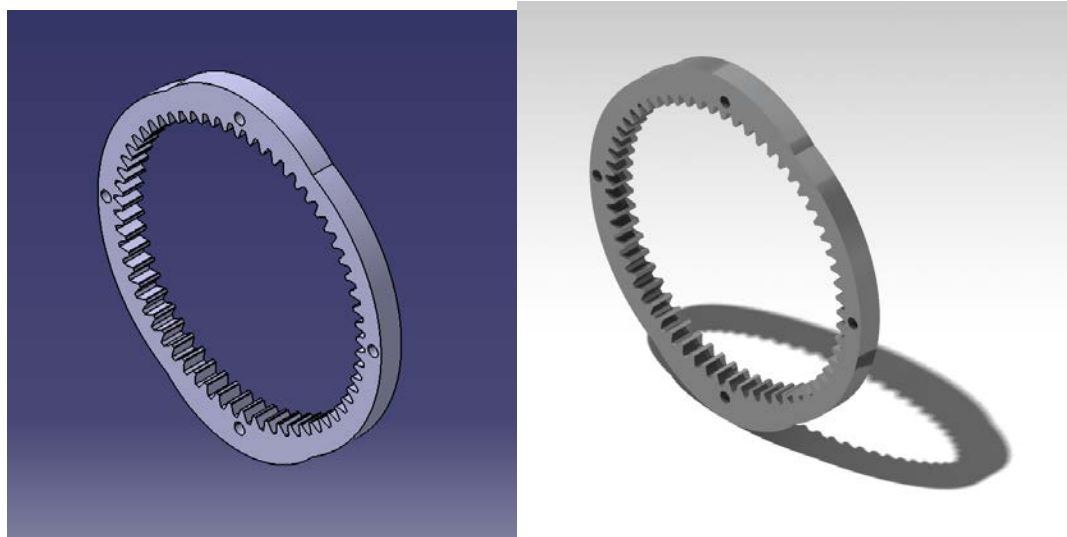


Figura 4.42 Modelo Part 29 en Catia V5.

4.1.21 Part 30. Cam rod

La principal función del plato de levas de escape es conseguir acoplar el movimiento de giro del cigüeñal con el de subida y bajada de los balancines que controlan las válvulas de escape. Para ello, se une con tornillos presentando un cierto desfase angular respecto al plato de levas de admisión. Para su modelado en Catia V5 se han utilizado las herramientas de **Pad**, **Groove** y **Pocket** que nos permiten realizar extrusiones, vaciados de revolución y extrusiones de vaciado respectivamente, todas ellas partiendo de un **Sketch**. Finalmente, la herramienta **EdgeFillet** se ha empleado para realizar los redondeos de las esquinas correspondientes.

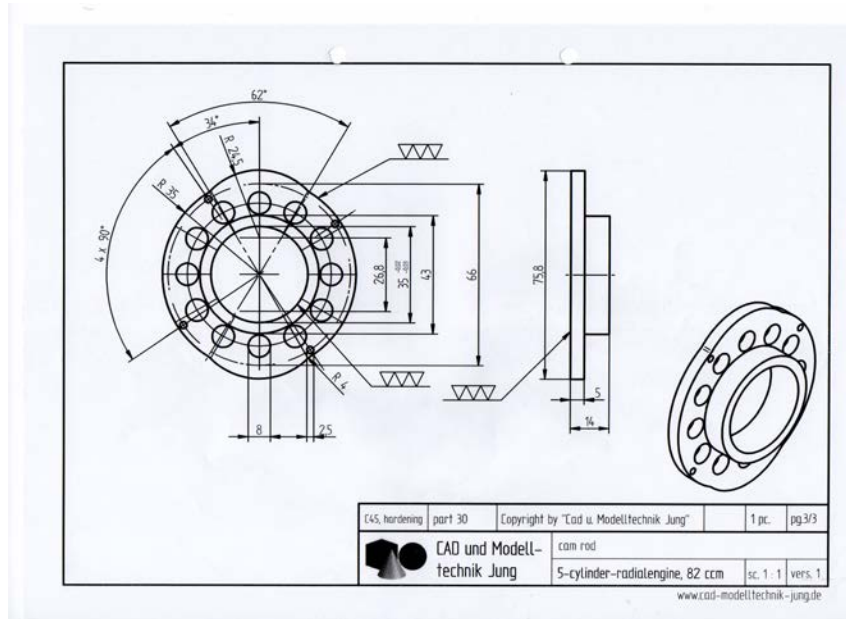


Figura 4.43 Plano Part 30.

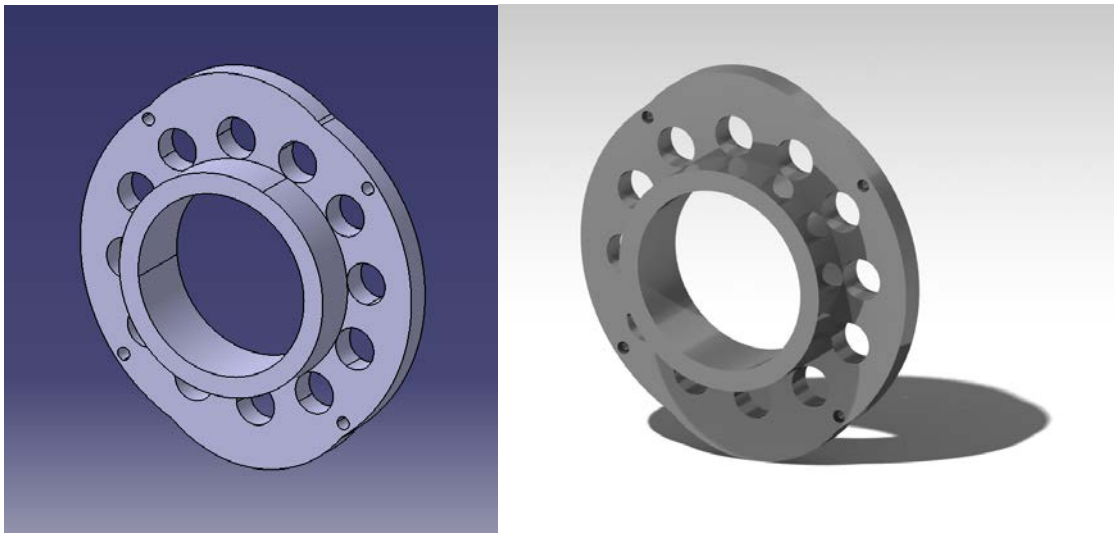


Figura 4.44 Modelo Part 30 en Catia V5.

4.1.22 Part 31. Cam rod housing

El alojamiento de las levas es la estructura que alinea el movimiento de subida y bajada de los seguidores de las levas con el movimiento rotativo del cigüeñal.

Para su modelado en Catia V5 se han utilizado las herramientas de **Shaft** y **Hole** que nos permiten realizar sólidos de revolución y agujeros respectivamente, ambas partiendo de un **Sketch**. Finalmente, la herramienta **CircPattern** se ha empleado para realizar la reproducción del patrón circular de los agujeros.

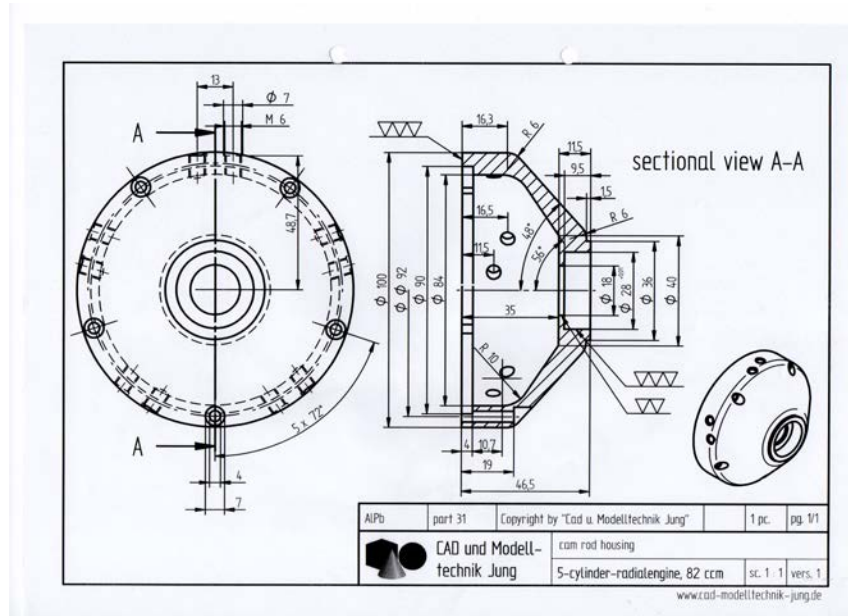


Figura 4.45 Plano Part 31.

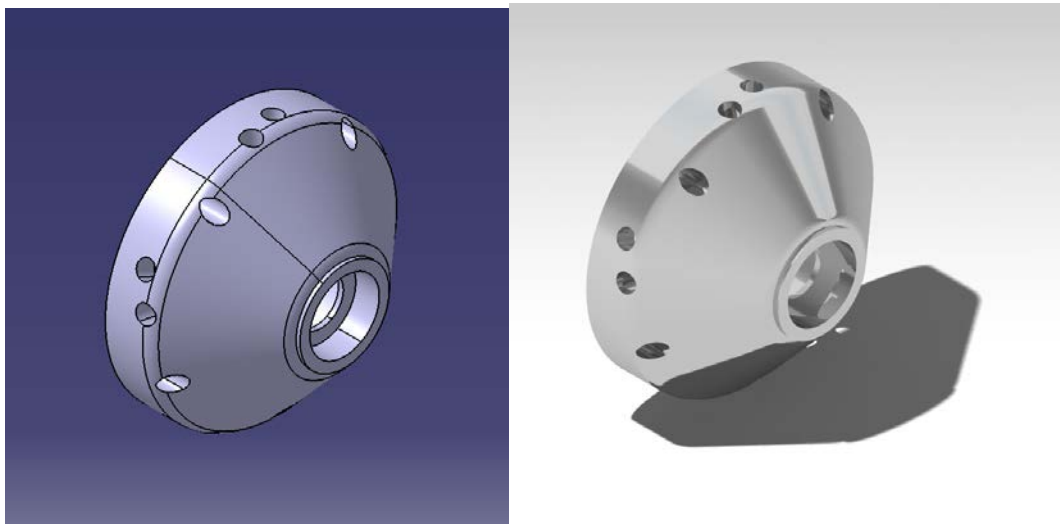


Figura 4.46 Modelo Part 31 en Catia V5.

4.1.23 Part 33. Link rod

Las bieletas se encargan de conectar los pistones secundarios con la biela madre, estando esta última conectada al cigüeñal asegurando la transmisión de fuerzas entre ambos elementos.

Para su modelado en Catia V5 se han utilizado las herramientas de **Pad** y **Hole** que nos permiten extruir y realizar agujeros respectivamente, ambas partiendo de un **Sketch**. Así como la herramienta de redondeado de esquinas **EdgeFillet** para suavizar los bordes de la pieza. Combinando estas herramientas se alcanza el resultado final mostrado en las imágenes adjuntas.

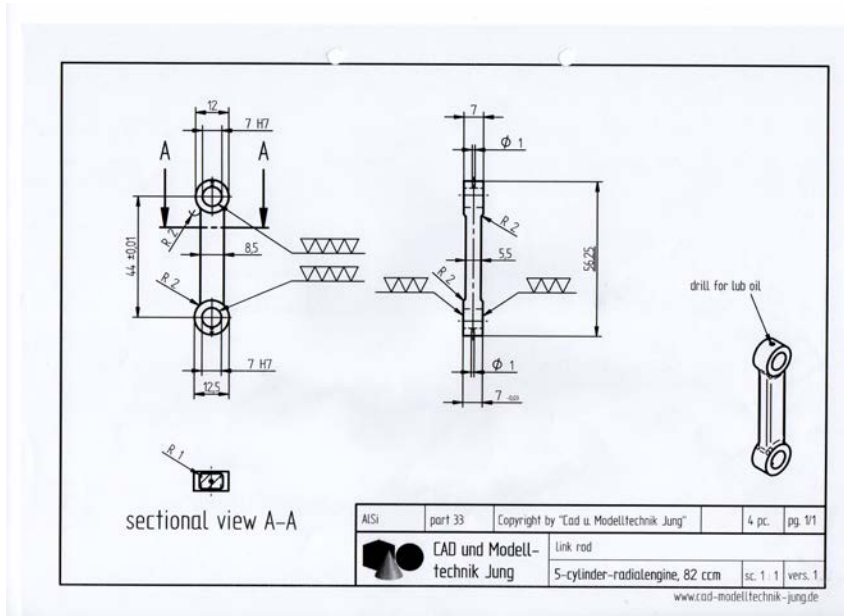


Figura 4.47 Plano Part 33.

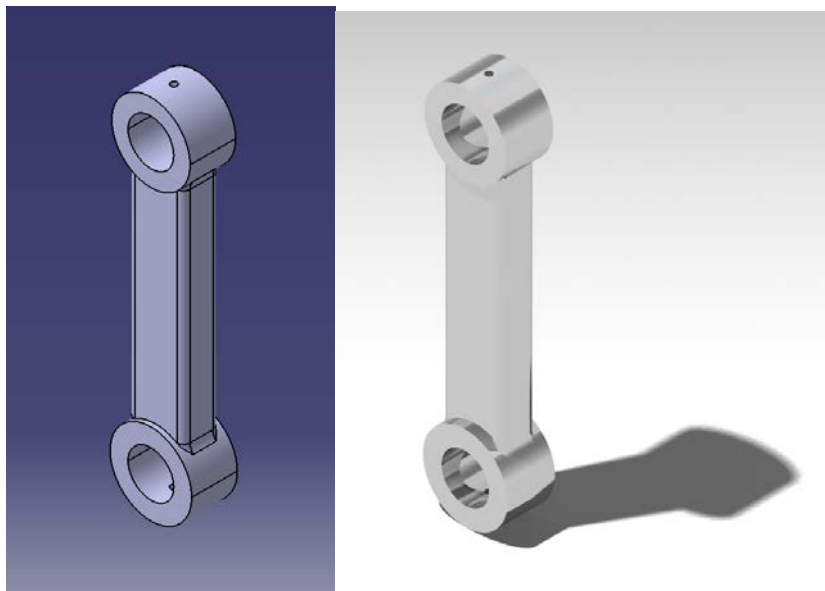


Figura 4.48 Modelo Part 33 en Catia V5.

4.1.24 Part 34. Rod bolt

La función del pasador de la bieleta es la de unir la bieleta a la biela madre.

Para su modelado en Catia V5 se ha empleado la herramienta **Pad** que permite extruir el **Sketch** asociado. Además, para realizar el achaflanado de las bases se ha empleado la herramienta **Chamfer**.

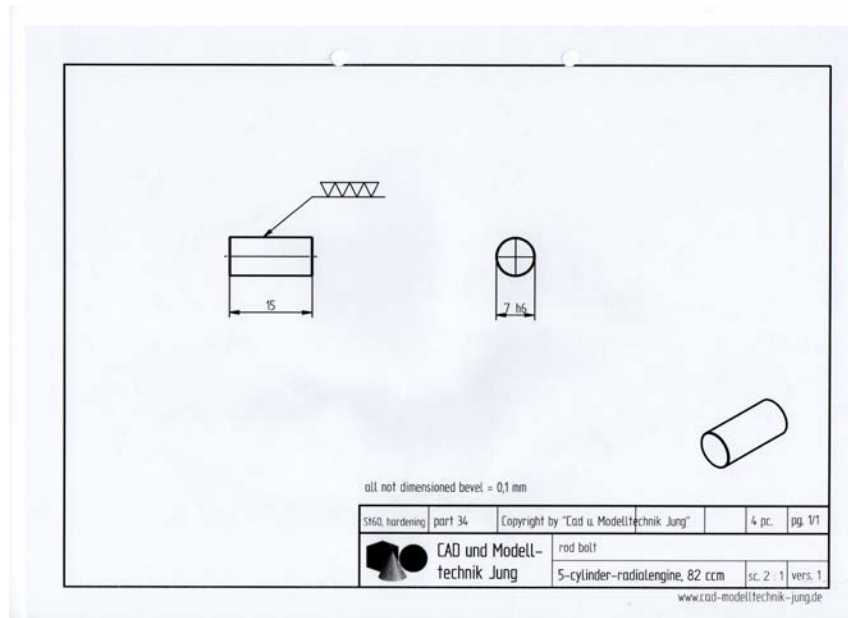


Figura 4.49 Plano Part 34.

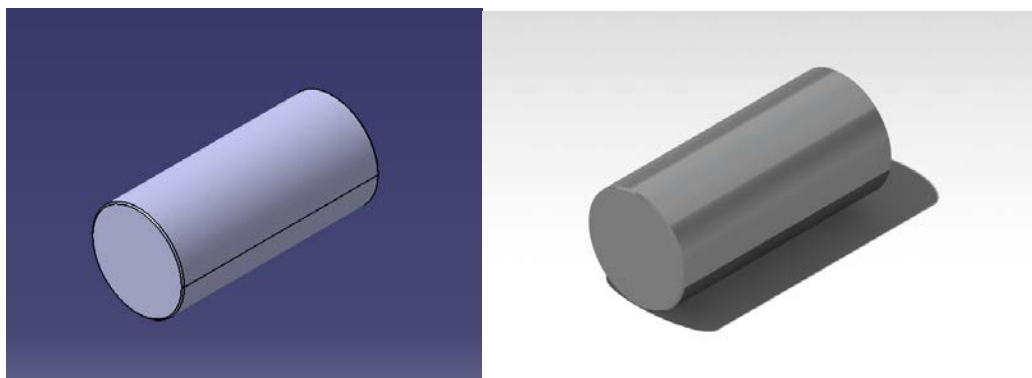


Figura 4.50 Modelo Part 34 en Catia V5.

4.1.25 Part 35. Propeller driver

La principal función del conductor de la hélice es la de transferir la potencia generada en el motor a la hélice.

Para su modelado en Catia V5 se ha empleado la herramienta **Shaft** que permite realizar sólidos de revolución a partir del **Sketch** asociado. Además, para realizar los agujeros se ha empleado la orden **Hole**.

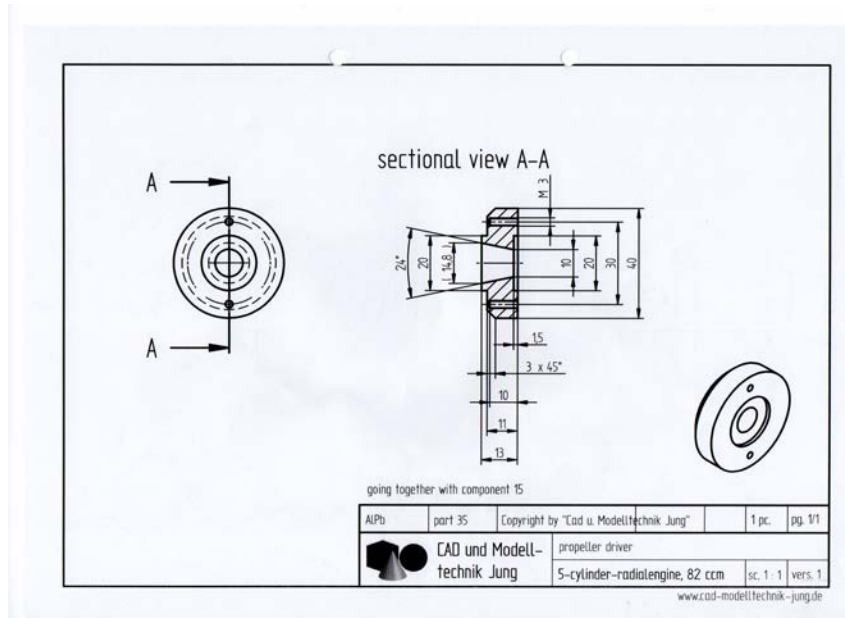


Figura 4.51 Plano Part 35.

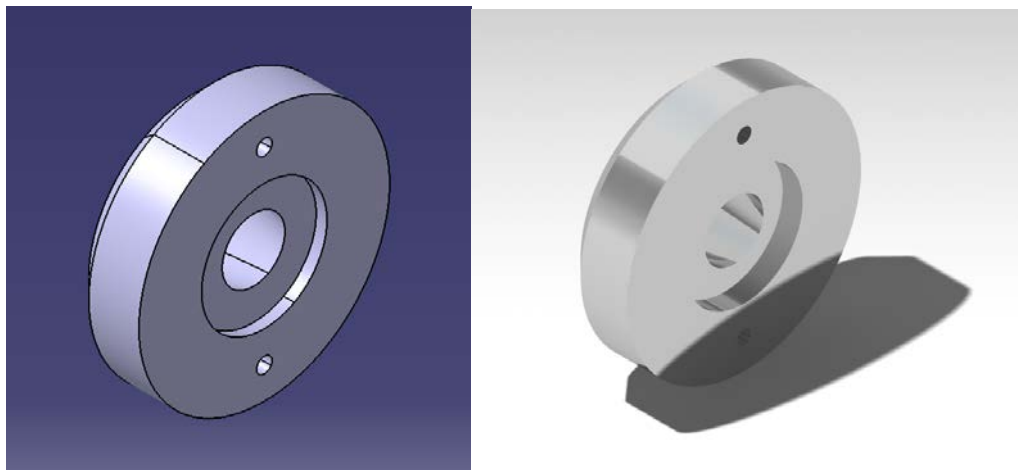


Figura 4.52 Modelo Part 35 en Catia V5.

4.1.26 Part 36. Suction housing cap

Las principales funciones de la tapa de la carcasa de succión son la protección y la aportación de soporte estructural para el alojamiento de los colectores de admisión.

Para su modelado en Catia V5 se han utilizado las herramientas de **Pad**, **Hole** y **Pocket** que nos permiten extruir, realizar agujeros y realizar extrusiones de vaciado respectivamente, todas ellas partiendo de un **Sketch**. Además, se ha empleado la orden **CircPattern** con el objetivo de reproducir el patrón circular de los agujeros presentes en la pieza, así como la herramienta de achaflanado **Chamfer** para realizar el chaflán del agujero central.

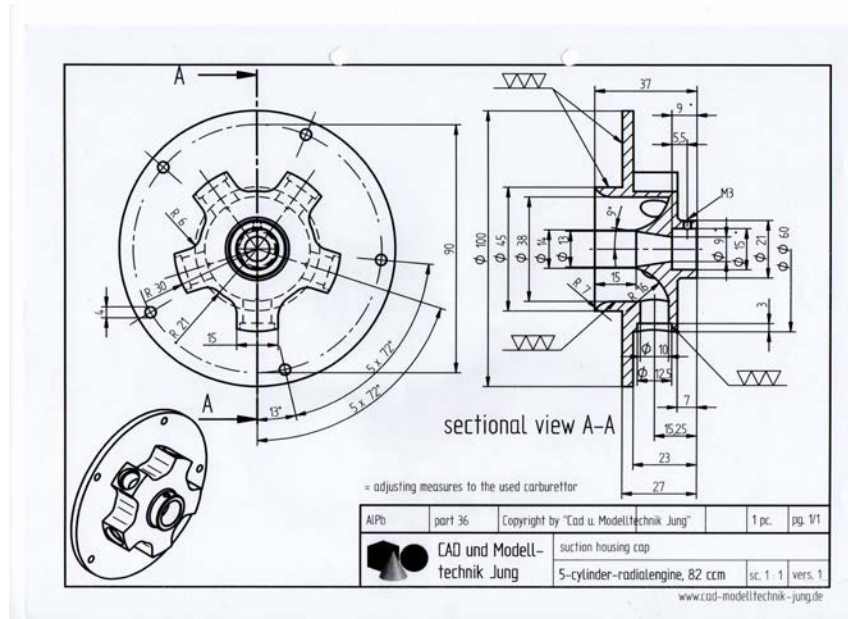


Figura 4.53 Plano Part 36.

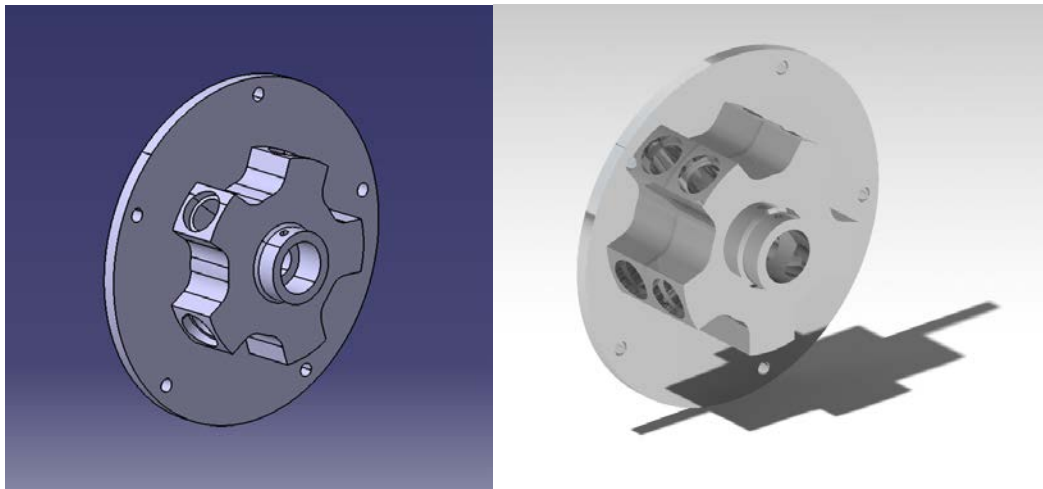


Figura 4.54 Modelo Part 36 en Catia V5.

4.1.27 Part 45. Spinner

La principal función del spinner es la optimización de la aerodinámica dado que consigue reducir la resistencia suavizando el flujo de aire alrededor del buje de la hélice.

Para su modelado en Catia V5 se han utilizado las herramientas de **Shaft**, **Hole** y **Pocket** que nos permiten realizar sólidos de revolución, realizar agujeros y realizar extrusiones de vaciado respectivamente, todas ellas partiendo de un **Sketch**.

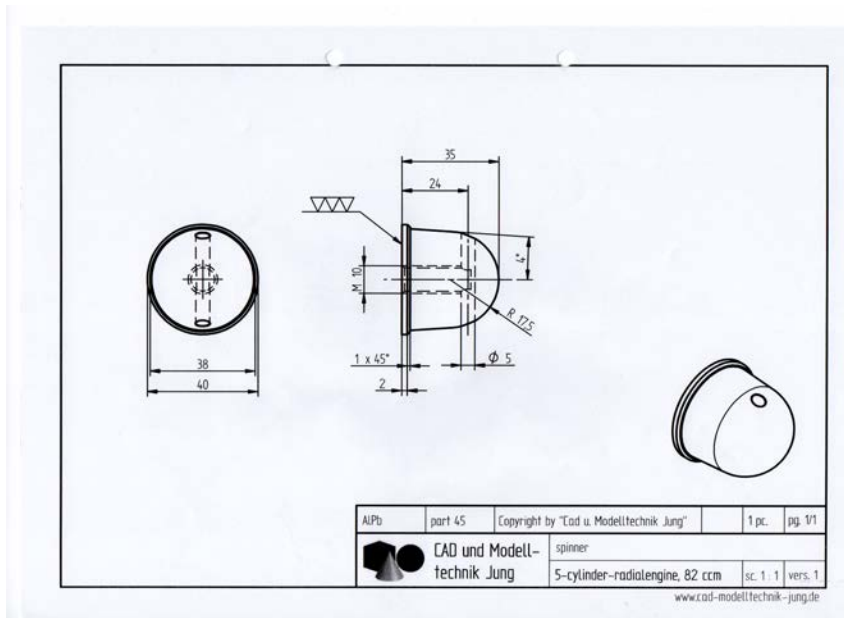


Figura 4.55 Plano Part 45.

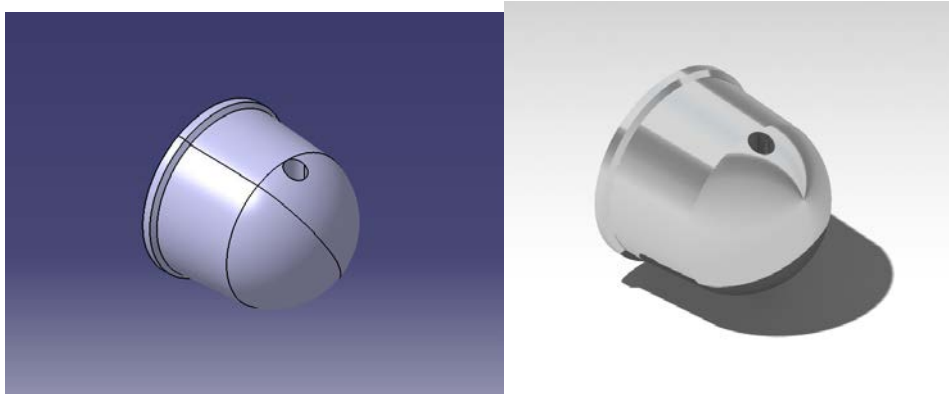


Figura 4.56 Modelo Part 45 en Catia V5.

4.1.28 Part 46. Cam follower

La principal función del seguidor de la leva es la de seguir el perfil del plato de levas correspondiente con el objetivo de transformar el movimiento rotativo del mismo en un movimiento lineal que abra y cierre las válvulas de admisión y escape del motor en el momento adecuado.

Para su modelado en Catia V5 se ha empleado la herramienta **Shaft** que permite realizar sólidos de revolución a partir del **Sketch** asociado. Además, para realizar el agujero se ha empleado la orden **Hole**.

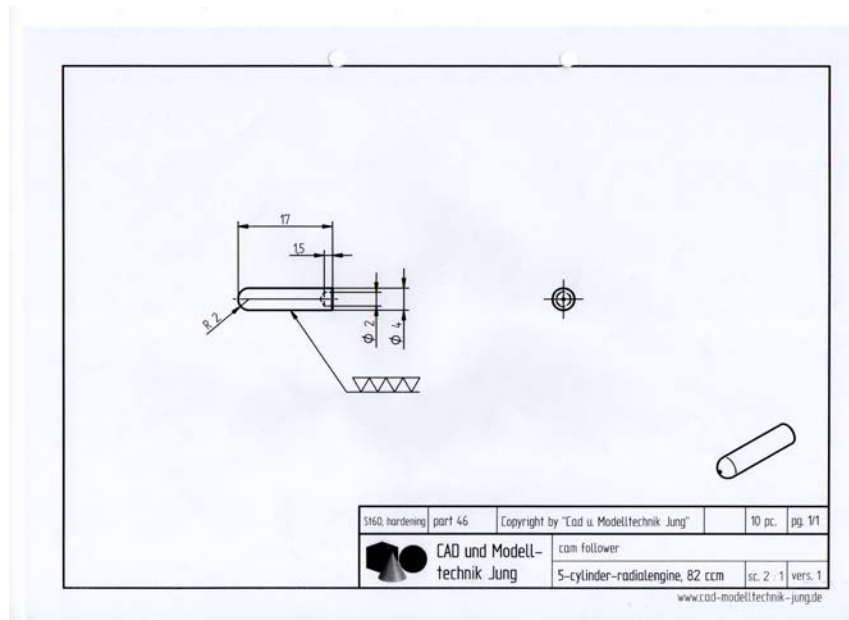


Figura 4.57 Plano Part 46.

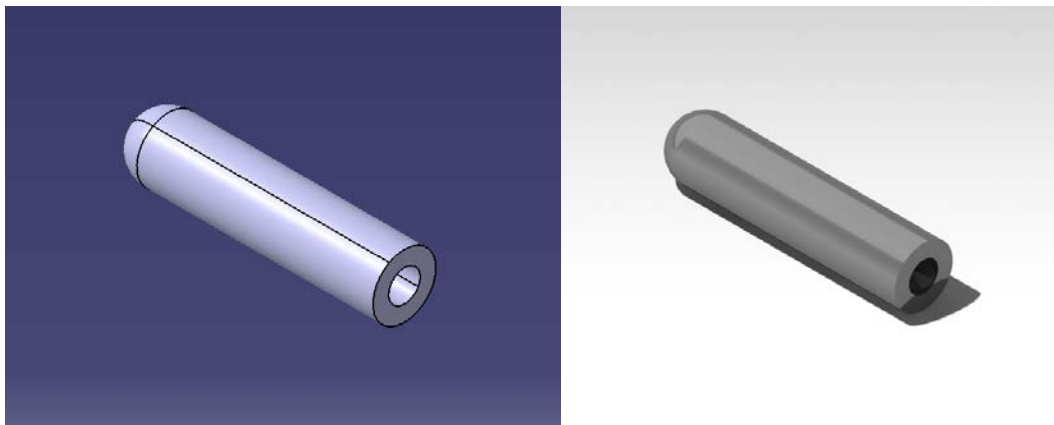


Figura 4.58 Modelo Part 46 en Catia V5.

4.1.29 Part 47. Slide guiding

La función de la guía de deslizamiento es la de permitir que el seguidor de la leva deslice adecuadamente por los orificios que los conectan con el plato de levas correspondiente.

Para su modelado en Catia V5 se ha empleado la herramienta **Shaft** que permite realizar sólidos de revolución a partir del **Sketch** asociado. Además, para realizar el agujero se ha empleado la orden **Pocket**.

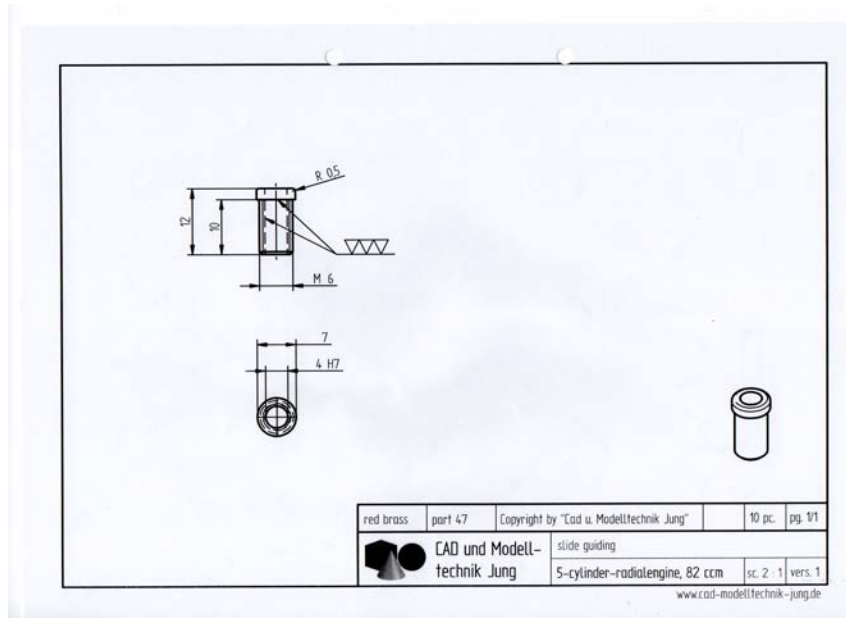


Figura 4.59 Plano Part 47.

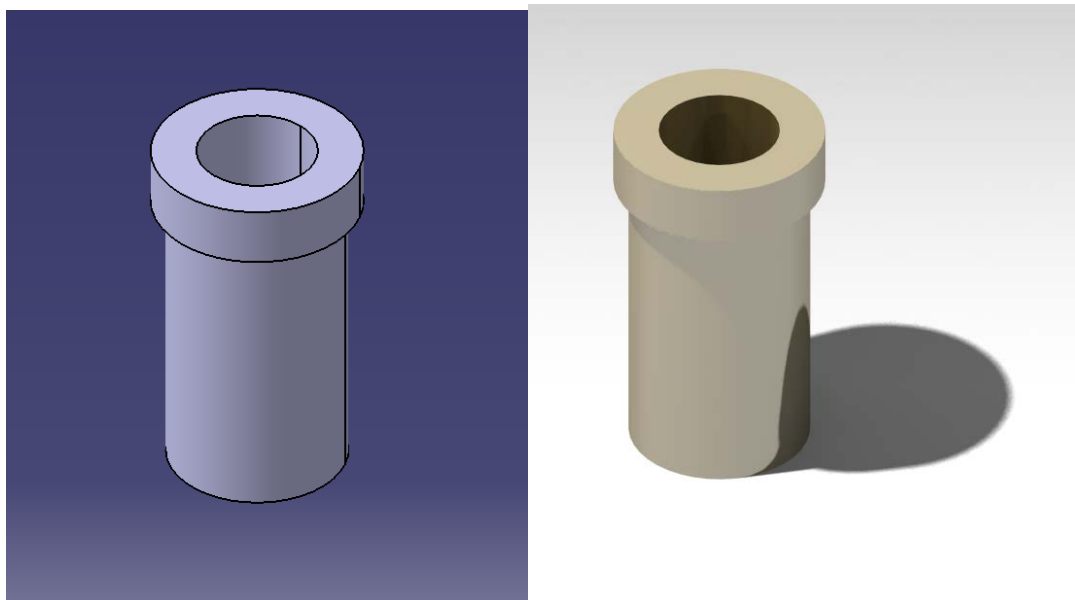


Figura 4.60 Modelo Part 47 en Catia V5.

4.1.30 Part 49. Valve

La principal función de las válvulas es la de permitir la entrada/salida de la mezcla de aire y combustible al/del cilindro.

Para su modelado en Catia V5 se ha empleado la herramienta **Shaft** que permite realizar sólidos de revolución a partir del **Sketch** asociado.

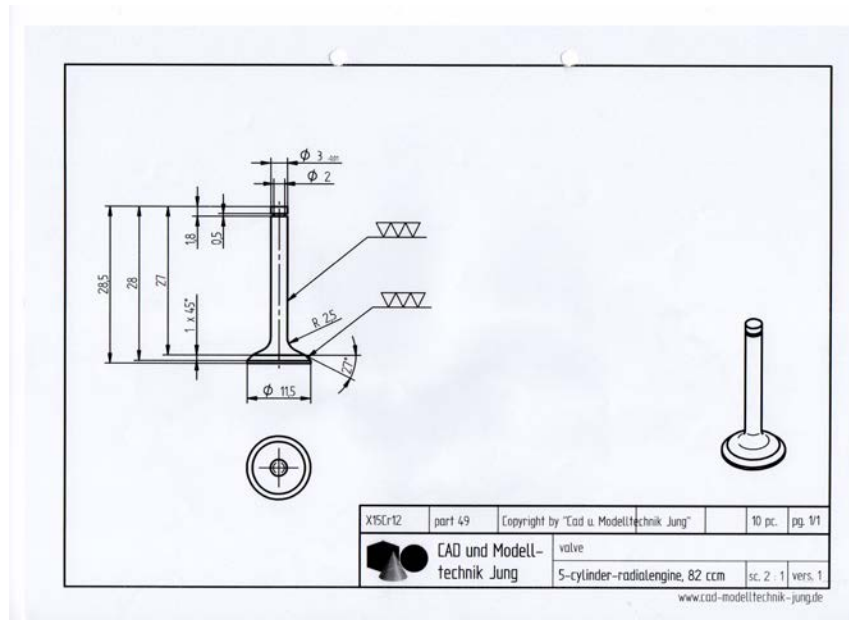


Figura 4.61 Plano Part 49.

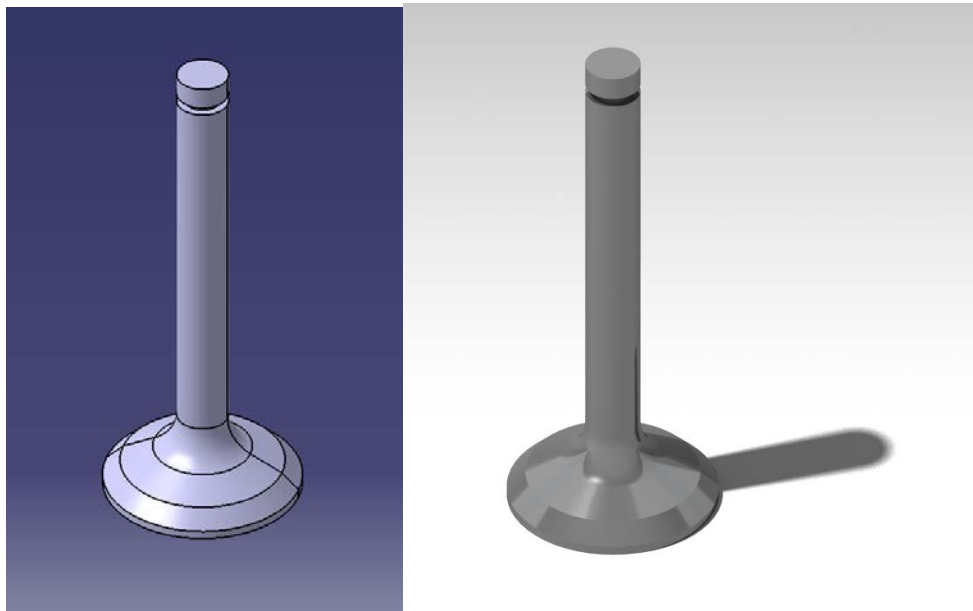


Figura 4.62 Modelo Part 49 en Catia V5.

4.1.31 Part 51. Valve cap

La principal función de la tapa de las válvulas es la protección. La tapa de válvula protege las válvulas, los resortes y otros componentes del tren de válvulas del polvo, la suciedad y otros contaminantes externos que podrían causar desgaste o daño.

Para su modelado en Catia V5 se han utilizado las herramientas de **Shaft**, **Hole** y **Pocket** que nos permiten realizar sólidos de revolución, hacer agujeros y realizar extrusiones de vaciado respectivamente, todas ellas partiendo de un **Sketch**. Además, se ha empleado la herramienta de achaflanado **Chamfer** para realizar los chaflanes correspondientes.

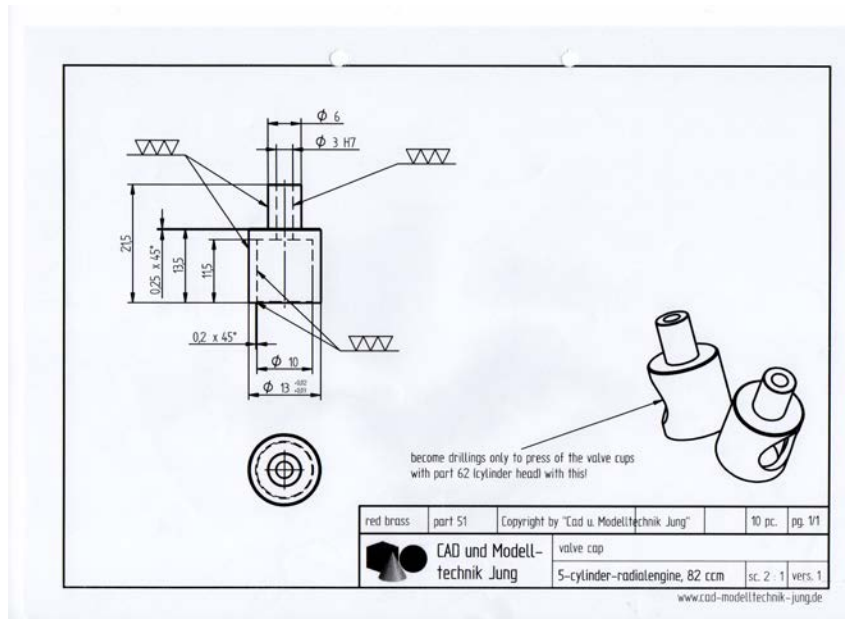


Figura 4.63 Plano Part 51.

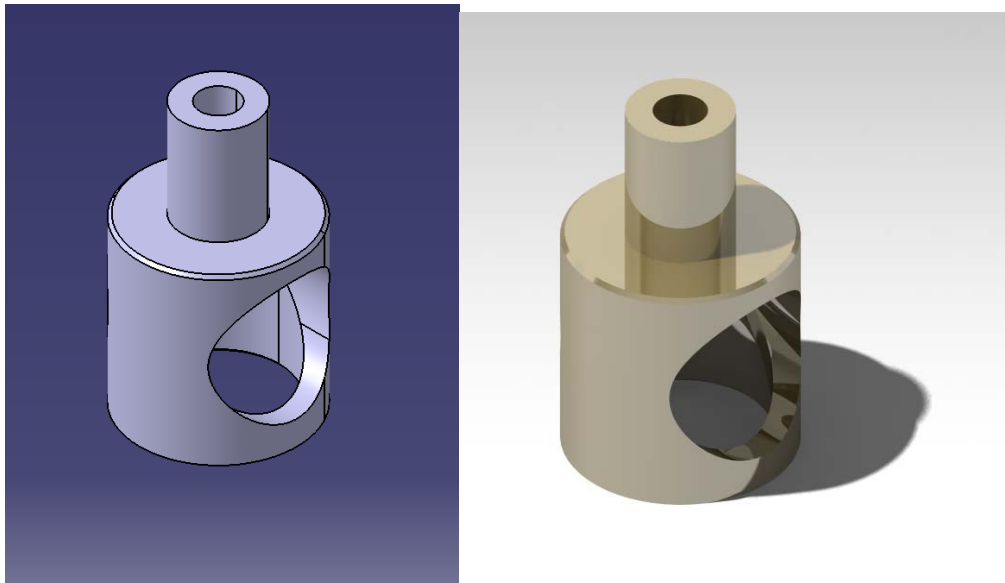


Figura 4.64 Modelo Part 51 en Catia V5.

4.1.32 Part 53. Screw connection

La función de estos tornillos es llevar a cabo la unión entre los colectores de admisión y escape y las culatas correspondientes.

Para su modelado en Catia V5 se han utilizado las herramientas de **Pad** y **Pocket** que nos permiten realizar extrusiones y extrusiones de vaciado respectivamente, ambas partiendo de un **Sketch**. Además, se ha empleado la herramienta de achaflanado **Chamfer** para realizar los chaflanes correspondientes así como la orden **Thread** para la realización del roscado asociado .

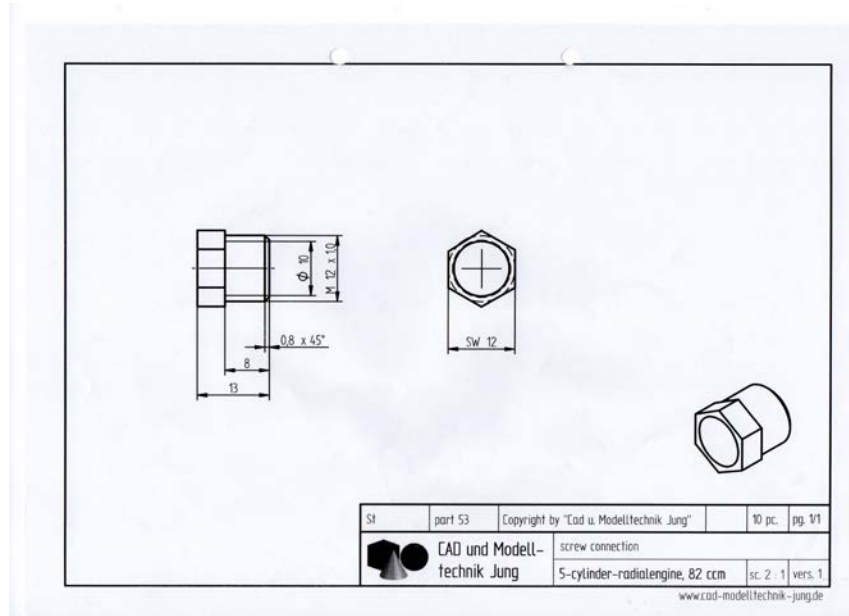


Figura 4.65 Plano Part 53.

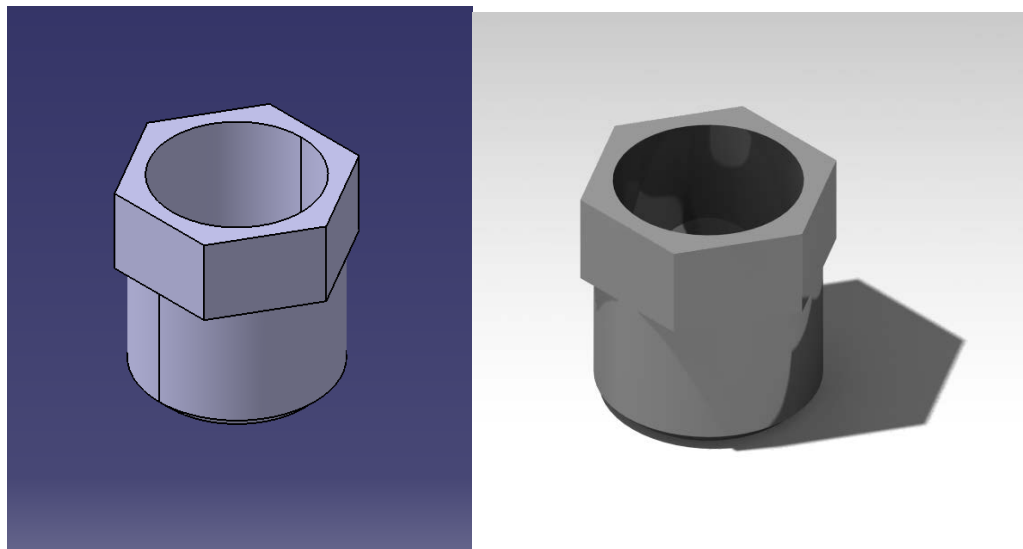


Figura 4.66 Modelo Part 53 en Catia V5.

4.1.33 Part 57. Gear, 15 teeth, modul 1

La función principal de este engranaje es la transmisión de potencia del eje secundario al engranaje del plato de levas de admisión con el objetivo de sincronizar el movimiento rotativo del cigüeñal con el movimiento de subida y bajada de los seguidores de las levas.

Para su modelado en Catia V5 se han utilizado las herramientas de **Pad** y **Pocket** que nos permiten realizar extrusiones y extrusiones de vaciado respectivamente, ambas partiendo de un **Sketch**. Además, resaltar que para el perfil de los dientes de dicho engranaje se han tenido en cuenta tanto su módulo como el número de dientes y se han realizado una serie de cálculos desarrollados en el Anexo A.

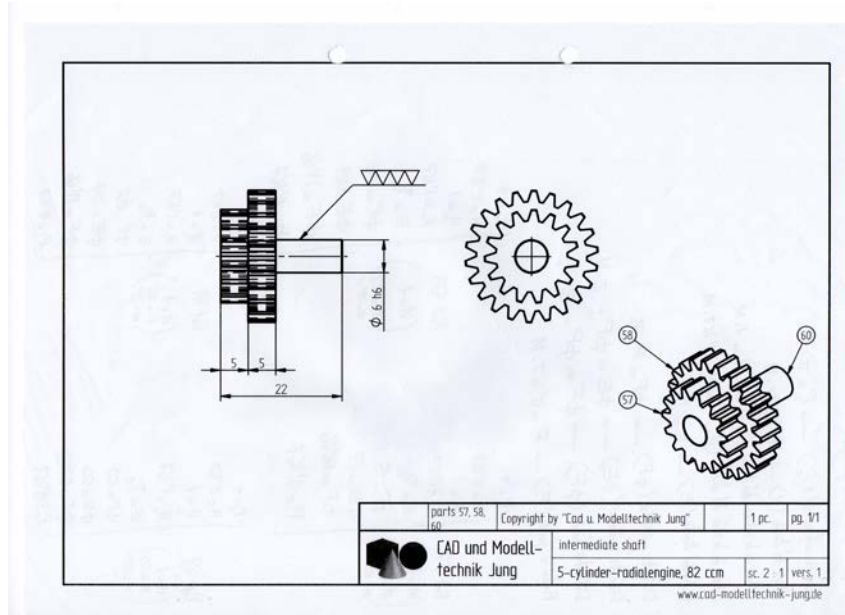


Figura 4.67 Plano Parts 57,58 y 60.

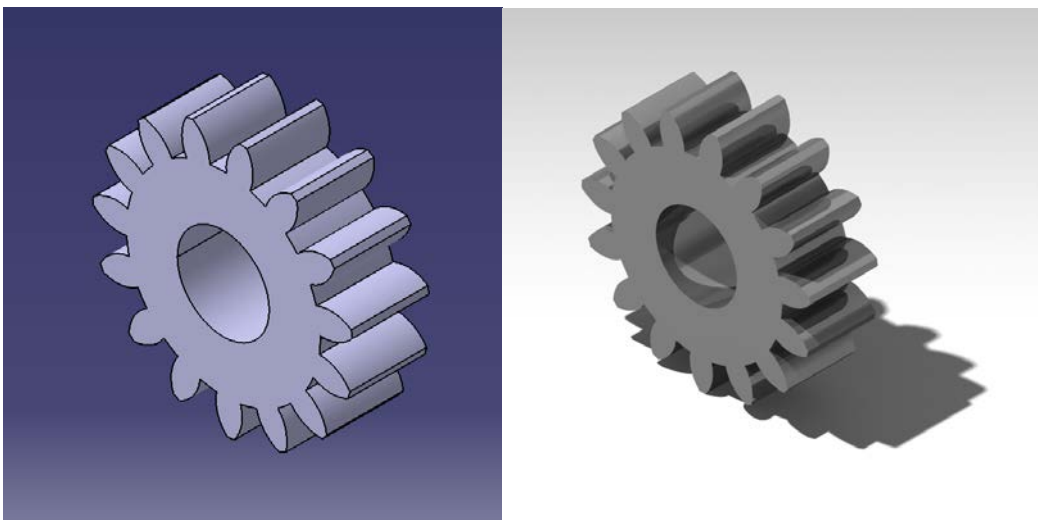


Figura 4.68 Modelo Part 57 en Catia V5.

4.1.34 Part 58. Gear, 22 teeth, modul 1

La función principal de este engranaje es la transmisión de potencia entre el eje primario (cigüeñal) y el eje secundario con el objetivo de sincronizar el movimiento rotativo del cigüeñal con el movimiento de subida y bajada de los seguidores de las levas.

Para su modelado en Catia V5 se han utilizado las herramientas de **Pad** y **Pocket** que nos permiten realizar extrusiones y extrusiones de vaciado respectivamente, ambas partiendo de un **Sketch**. Además, resaltar que para el perfil de los dientes de dicho engranaje se han tenido en cuenta tanto su módulo como el número de dientes y se han realizado una serie de cálculos desarrollados en el Anexo A.

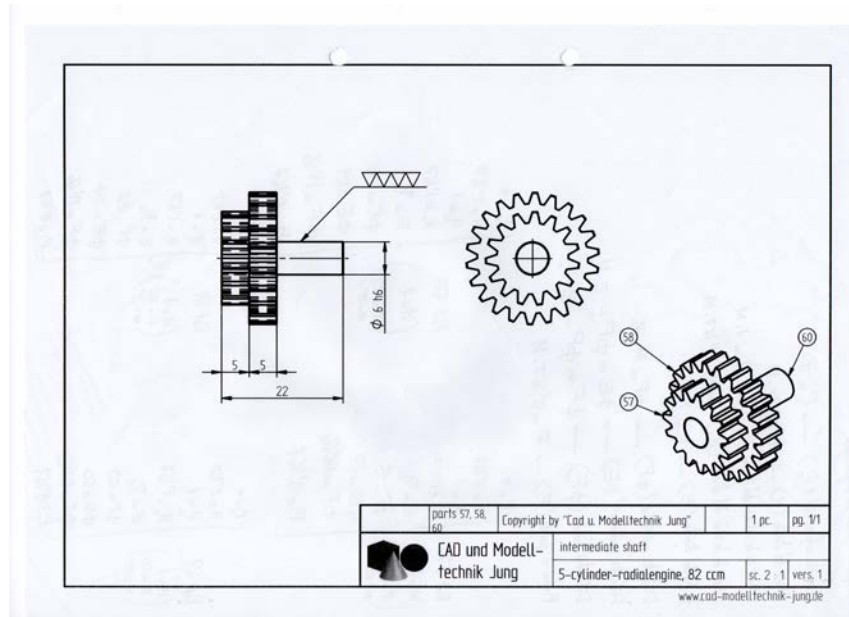


Figura 4.69 Plano Parts 57,58 y 60.

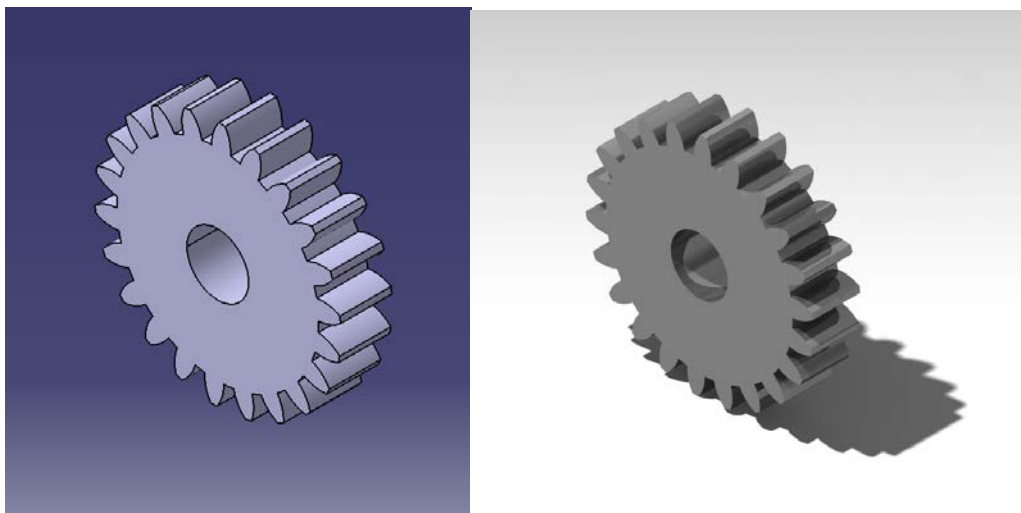


Figura 4.70 Modelo Part 58 en Catia V5.

4.1.35 Part 59. Gear crank, 22 teeth, modul 1

La función principal de este engranaje es la transmisión de potencia entre el eje primario (cigüeñal) y el eje secundario con el objetivo de sincronizar el movimiento rotativo del cigüeñal con el movimiento de subida y bajada de los seguidores de las levas.

Para su modelado en Catia V5 se han utilizado las herramientas de **Pad** y **Pocket** que nos permiten realizar extrusiones y extrusiones de vaciado respectivamente, ambas partiendo de un **Sketch**. Además, resaltar que para el perfil de los dientes de dicho engranaje se han tenido en cuenta tanto su módulo como el número de dientes y se han realizado una serie de cálculos desarrollados en el Anexo A.

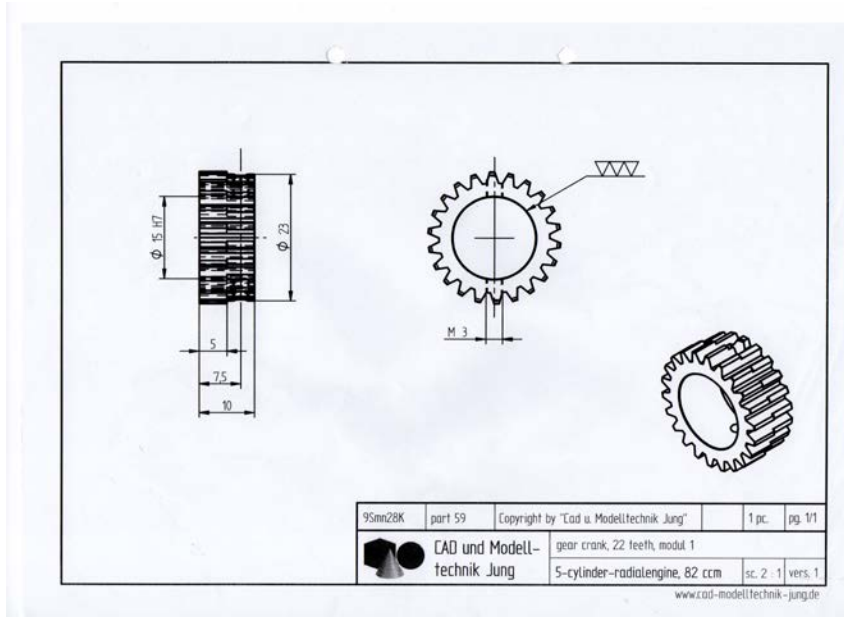


Figura 4.71 Plano Part 59.

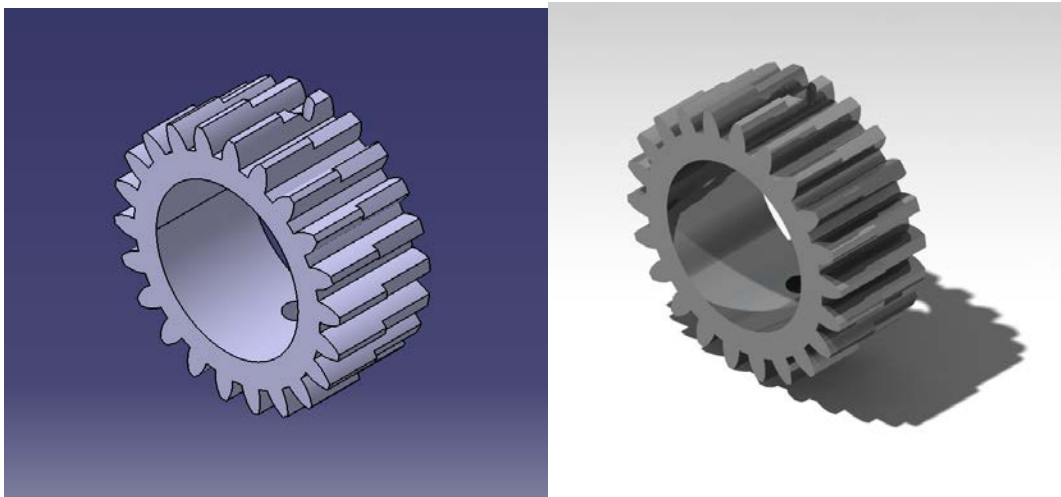


Figura 4.72 Modelo Part 59 en Catia V5.

4.1.36 Part 60. Intermediate shaft

La principal función del eje secundario es la de servir de soporte para los engranajes de transmisión de potencia entre el eje principal (cigüeñal) y los platos de levas.

Para su modelado en Catia V5 se ha empleado la herramienta **Pad** que nos permite realizar extrusiones a partir de un **Sketch**.

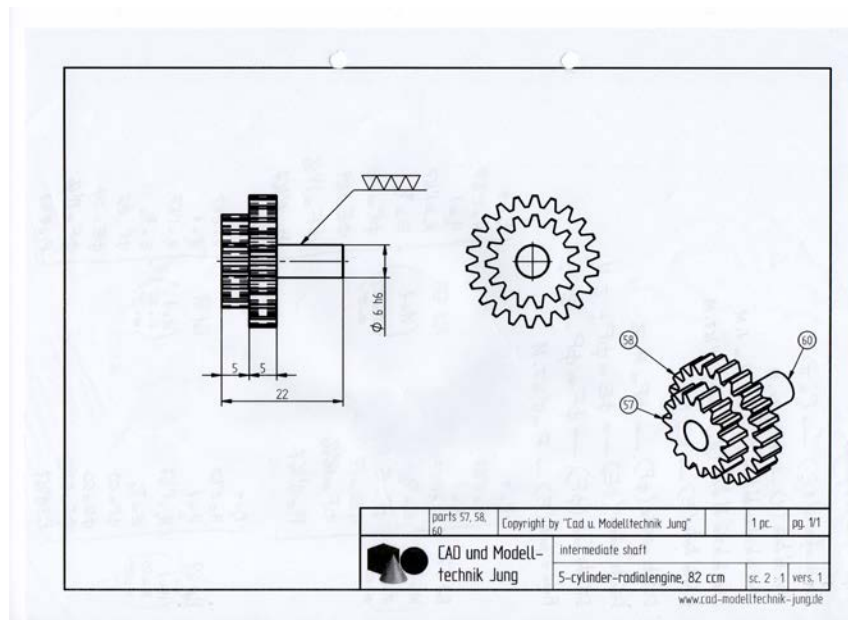


Figura 4.73 Plano Parts 57,58 y 60.

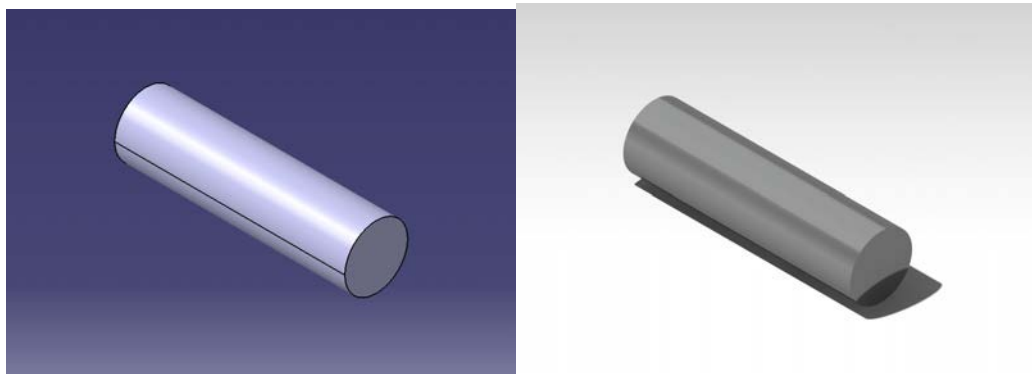


Figura 4.74 Modelo Part 60 en Catia V5.

4.1.37 Part 61. Cylinder

La principal función de los cilindros es la de alojar el proceso de combustión del aire y el combustible, es decir, sirven como cámaras de combustión. Dentro de cada cilindro, se genera un proceso de combustión que permite convertir la energía química del combustible en la energía mecánica que mueve los pistones.

Para su modelado en Catia V5 se han utilizado las herramientas de **Shaft**, **Pad**, **Groove** y **Pocket** que nos permiten realizar sólidos de revolución, extruir, realizar vaciados de revolución y realizar extrusiones de vaciado respectivamente, todas ellas partiendo de un **Sketch**. Además, se ha empleado la orden **RectPattern** con el objetivo de reproducir el patrón de los agujeros presentes en la pieza.

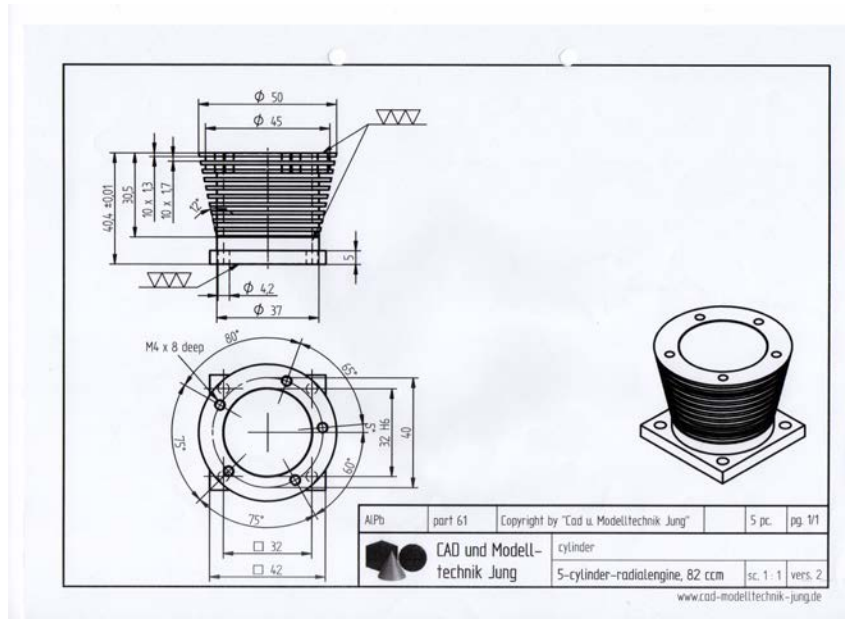


Figura 4.75 Plano Part 61.

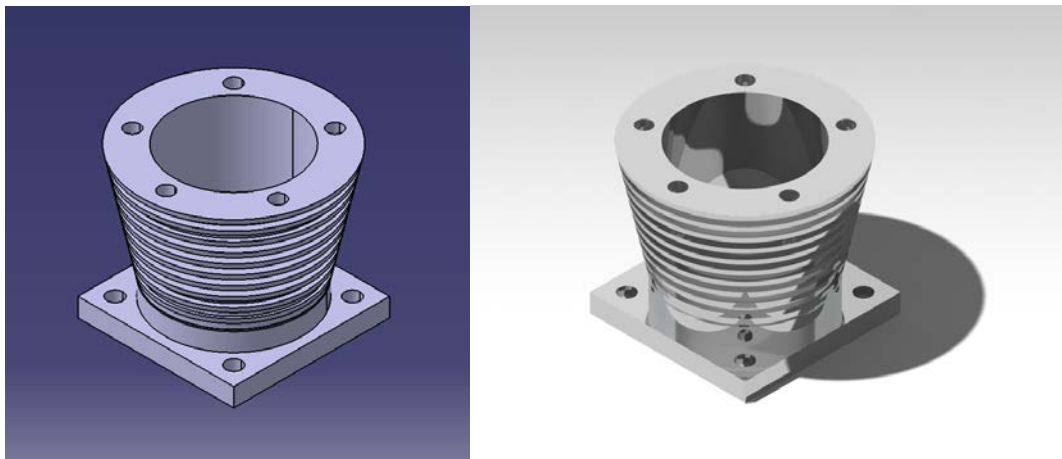


Figura 4.76 Modelo Part 61 en Catia V5.

4.1.38 Part 62. Cylinder head

La principal función de las culatas es la de alojar el movimiento de las válvulas de admisión y escape. Además, también se encargan de servir de soporte para algunos accesorios como los soportes de los balancines o los colectores de admisión/escape.

Para su modelado en Catia V5 se han utilizado las herramientas de **Shaft**, **Pad**, **Hole**, **Groove** y **Pocket** que nos permiten realizar sólidos de revolución, extruir, hacer agujeros, realizar vaciados de revolución y realizar extrusiones de vaciado respectivamente, todas ellas partiendo de un **Sketch**. Además, se ha empleado la orden **CircPattern** con el objetivo de reproducir el patrón de los agujeros presentes en la pieza. Resaltar que esta pieza ha sido en la que más tiempo de modelado se ha empleado por su complejidad.

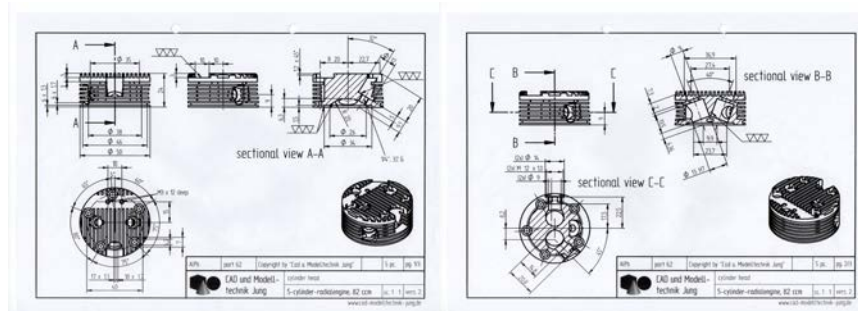


Figura 4.77 Planos Part 62.

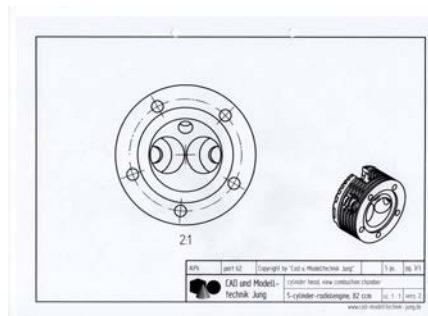


Figura 4.78 Plano Part 62.

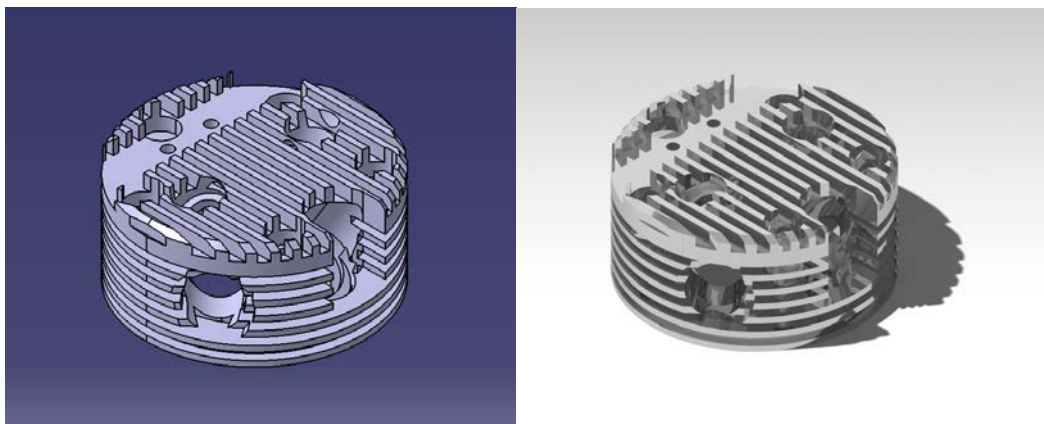


Figura 4.79 Modelo Part 62 en Catia V5.

4.1.39 Part 64. Cylinder liner

La principal función de las camisas de los cilindros es la de servir de protección para los cilindros proporcionando una superficie resistente sobre la que se produce el movimiento de los pistones. Para su modelado en Catia V5 se han utilizado las herramientas de **Shaft** y **Pocket** que nos permiten realizar sólidos de revolución y extrusiones de vaciado respectivamente, ambas partiendo de un **Sketch**.

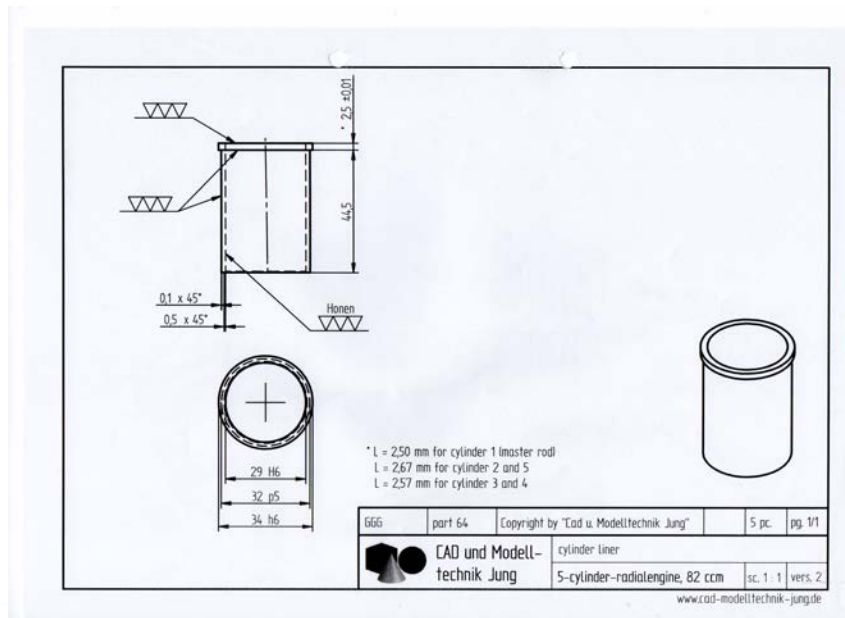


Figura 4.80 Plano Part 64.

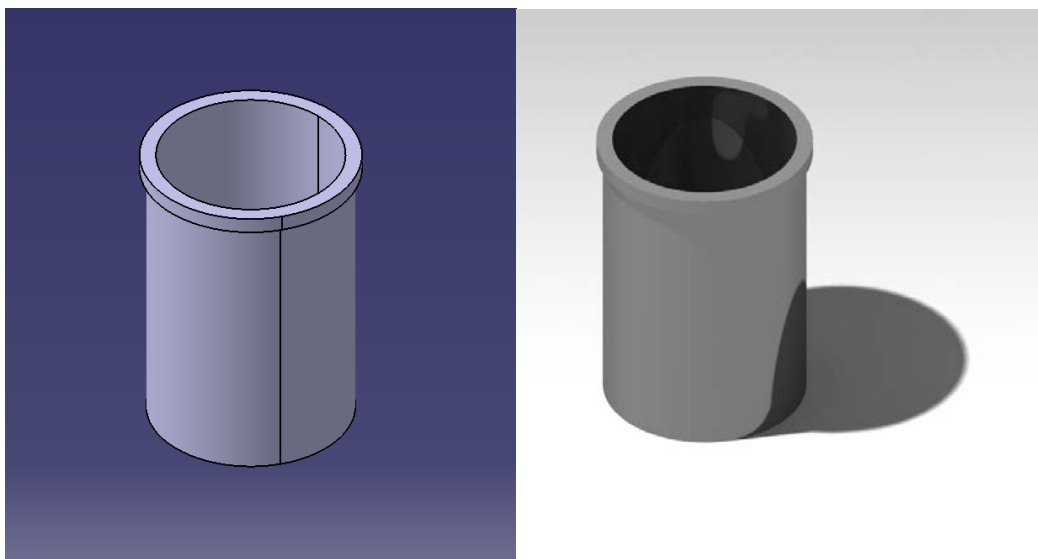


Figura 4.81 Modelo Part 64 en Catia V5.

4.2 Modelado y renderizado de las Standard Parts

4.2.1 Part 07. Adjusting screw, valve clearance

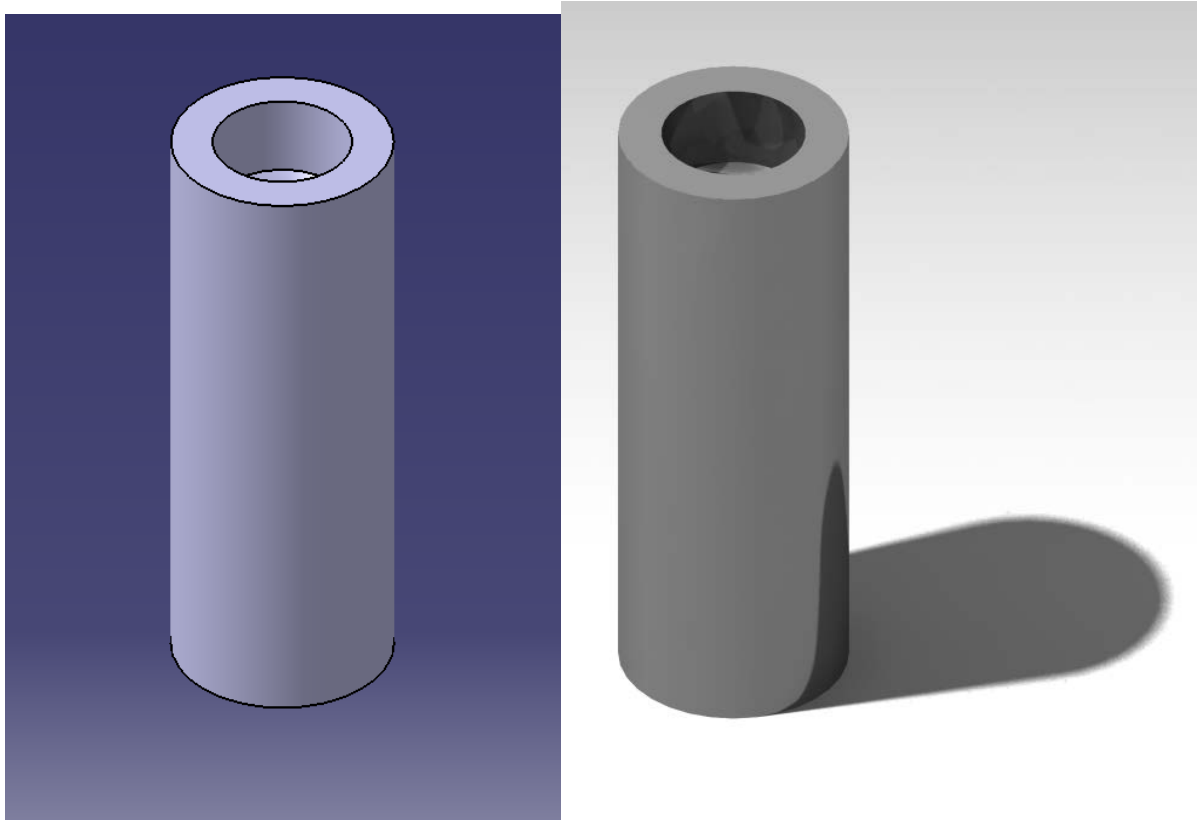


Figura 4.82 Modelo Part 07 en Catia V5.

4.2.2 Part 26. Hexagon socket set screw

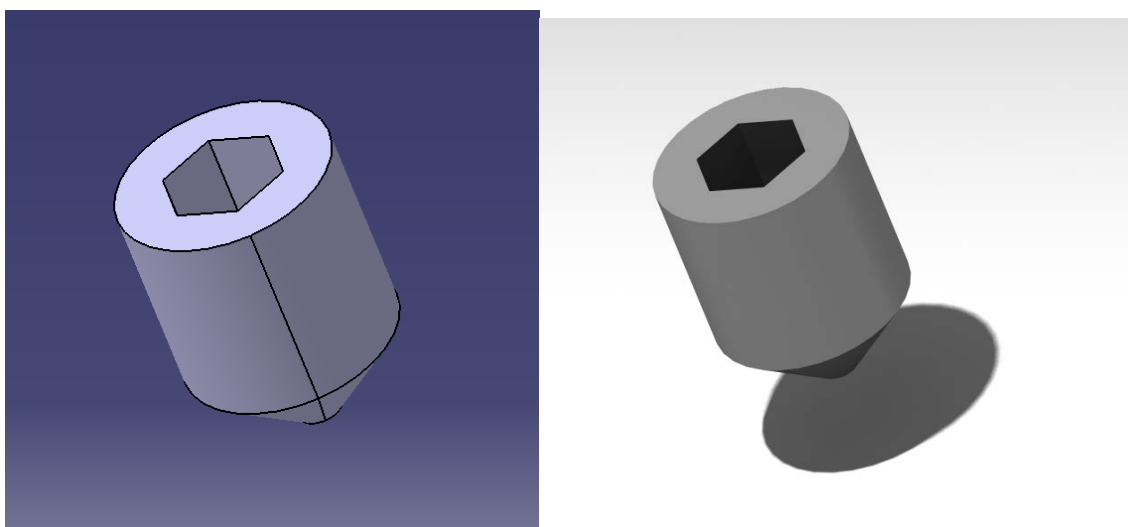


Figura 4.83 Modelo Part 26 en Catia V5.

4.2.3 Part 28. Nut

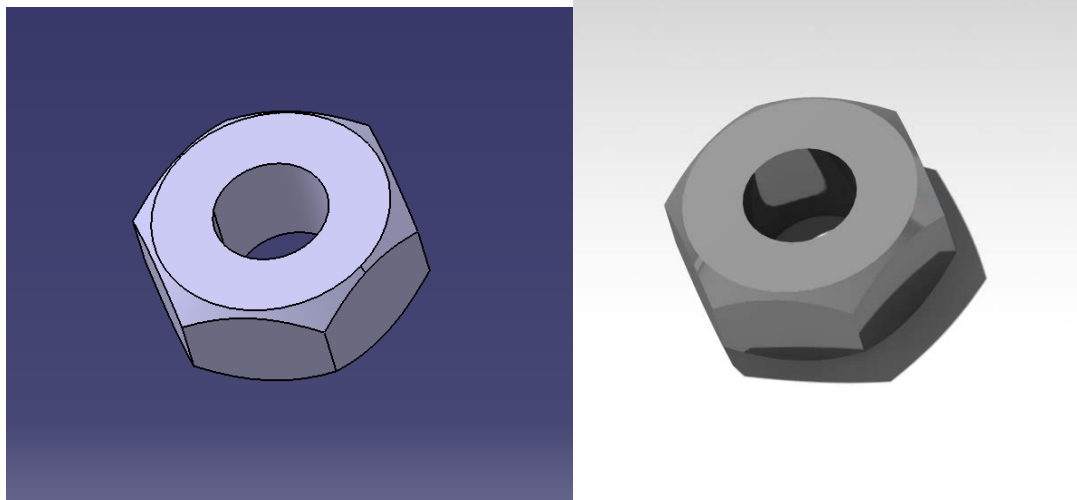


Figura 4.84 Modelo Part 28 en Catia V5.

4.2.4 Part 32. O-ring

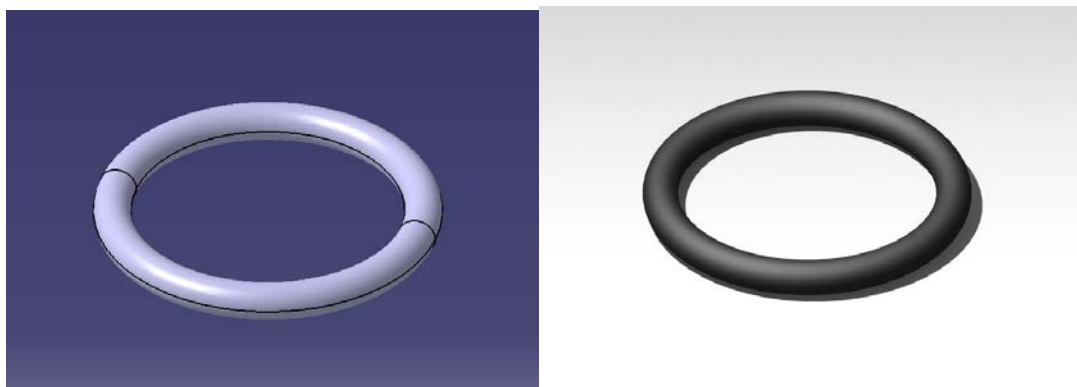


Figura 4.85 Modelo Part 32 en Catia V5.

4.2.5 Part 37. Socket screw

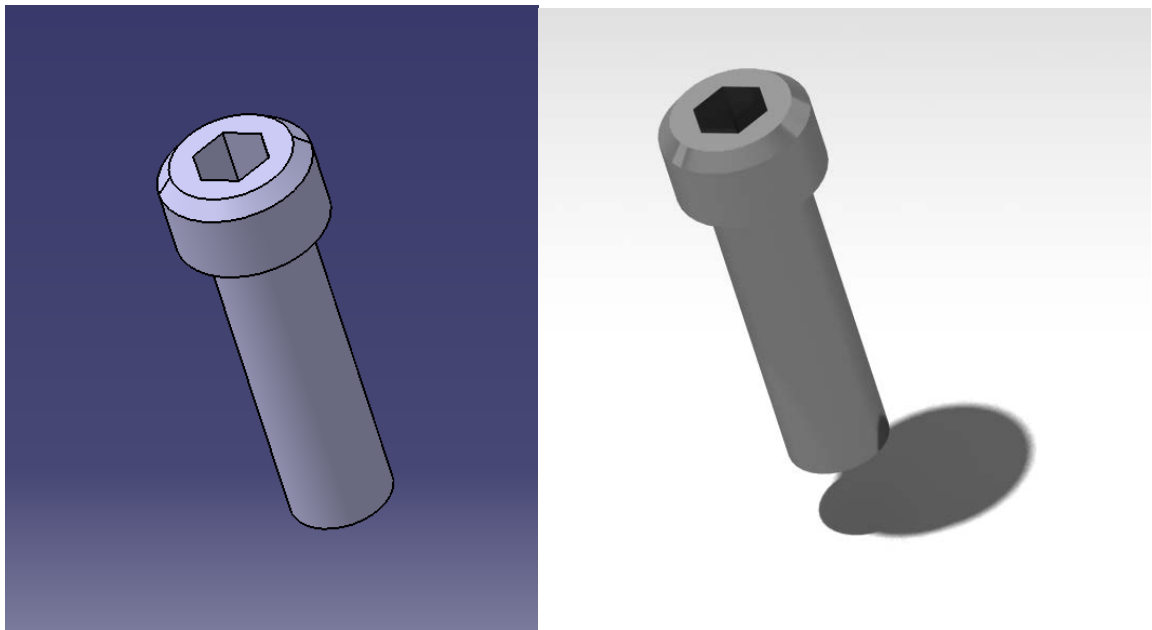


Figura 4.86 Modelo Part 37 en Catia V5.

4.2.6 Part 38. Socket screw

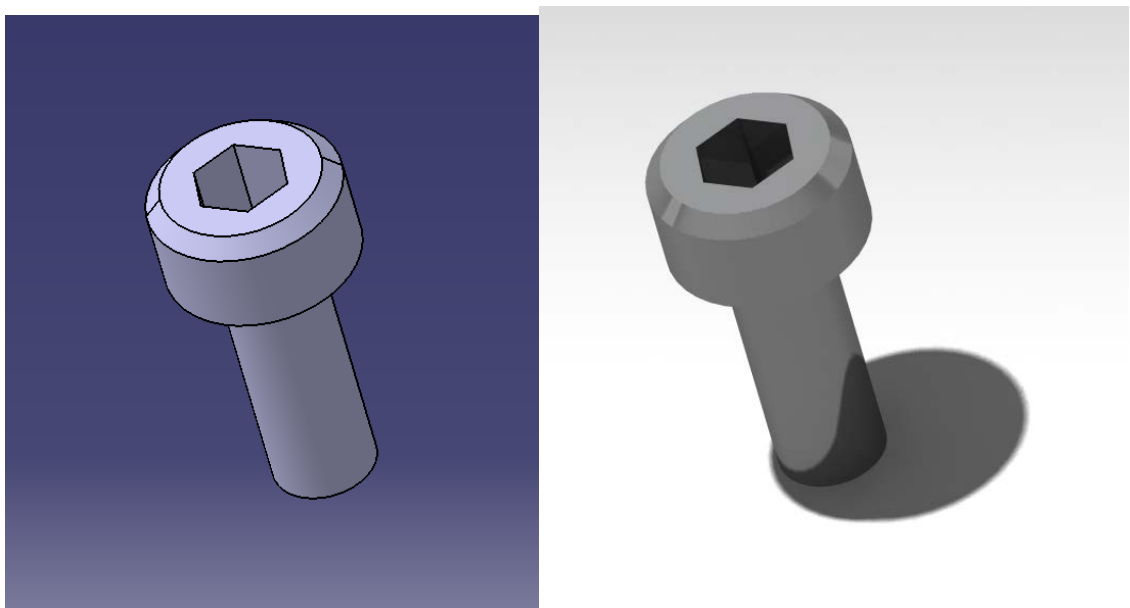


Figura 4.87 Modelo Part 38 en Catia V5.

4.2.7 Part 39. Socket screw

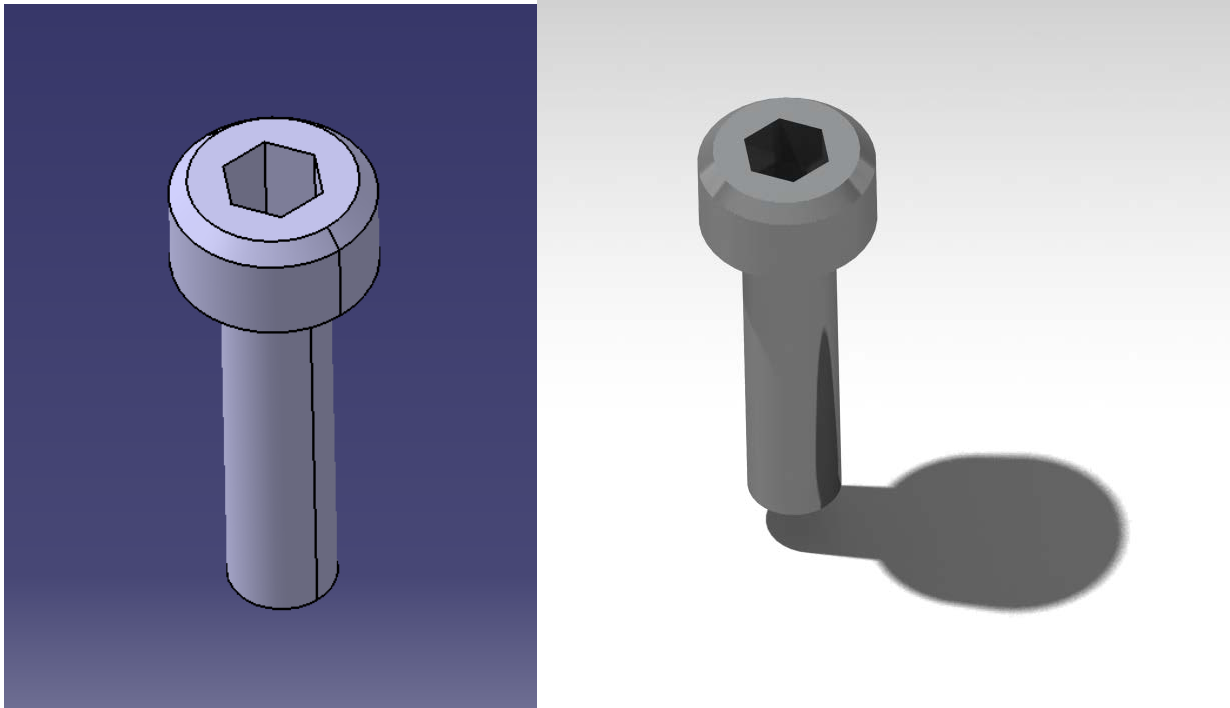


Figura 4.88 Modelo Part 39 en Catia V5.

4.2.8 Part 40. Socket screw

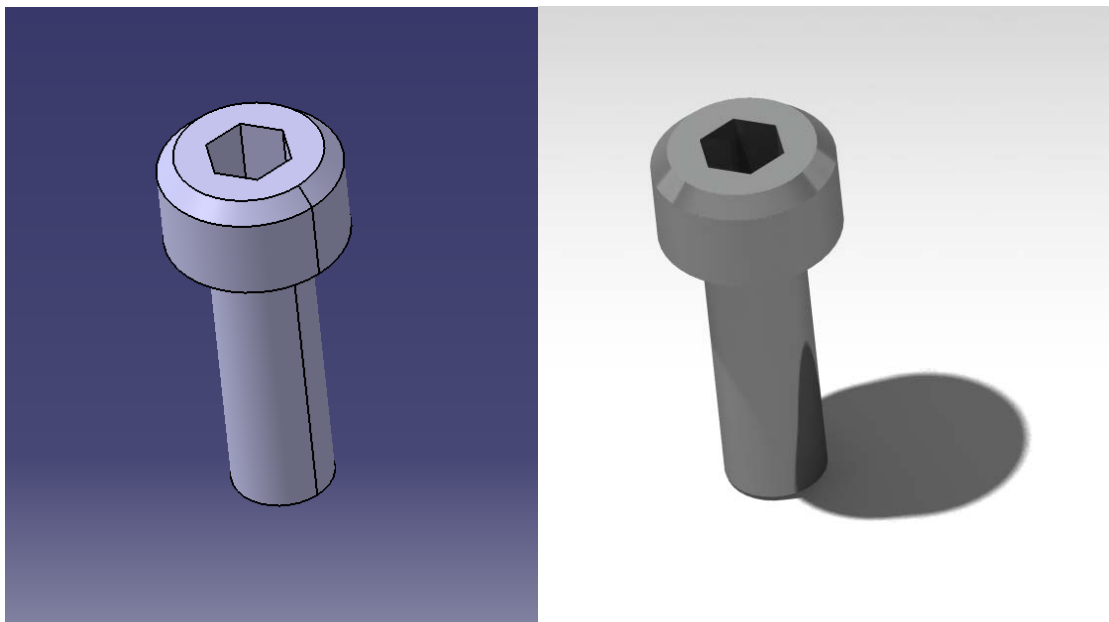


Figura 4.89 Modelo Part 40 en Catia V5.

4.2.9 Part 41. Socket screw

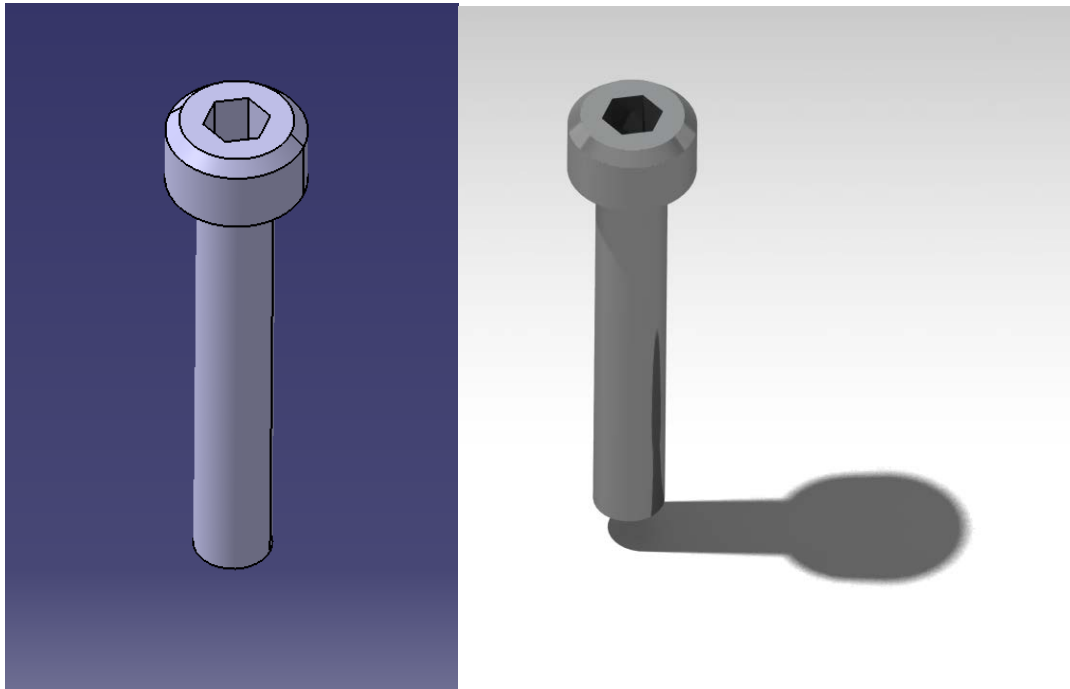


Figura 4.90 Modelo Part 41 en Catia V5.

4.2.10 Part 42. Socket screw

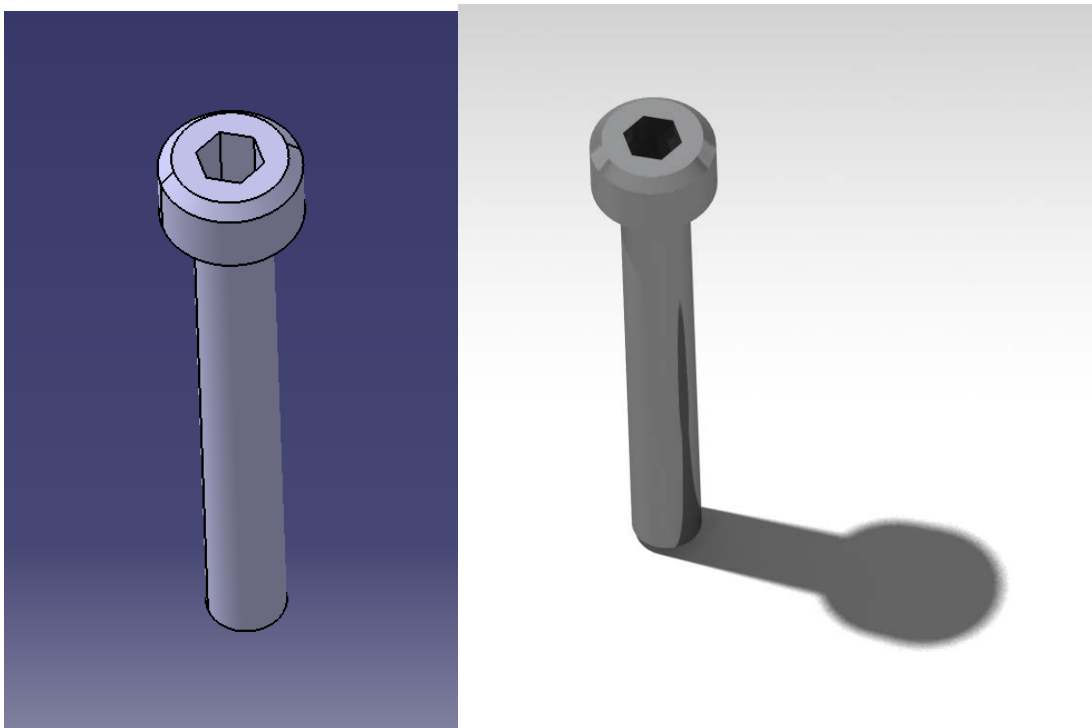


Figura 4.91 Modelo Part 42 en Catia V5.

4.2.11 Part 43. Countersunk socket screw

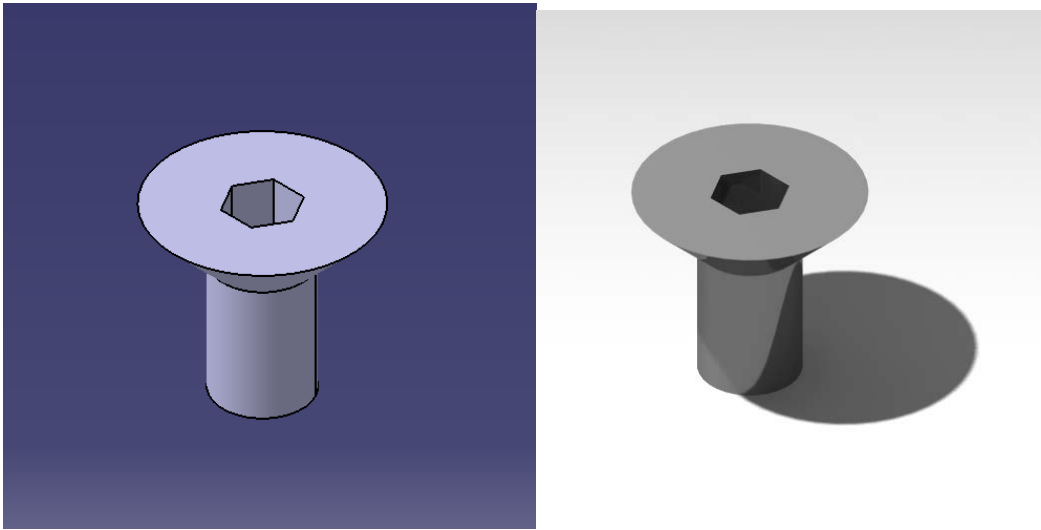


Figura 4.92 Modelo Part 43 en Catia V5.

4.2.12 Part 54. Shaft locking clip, 15 mm

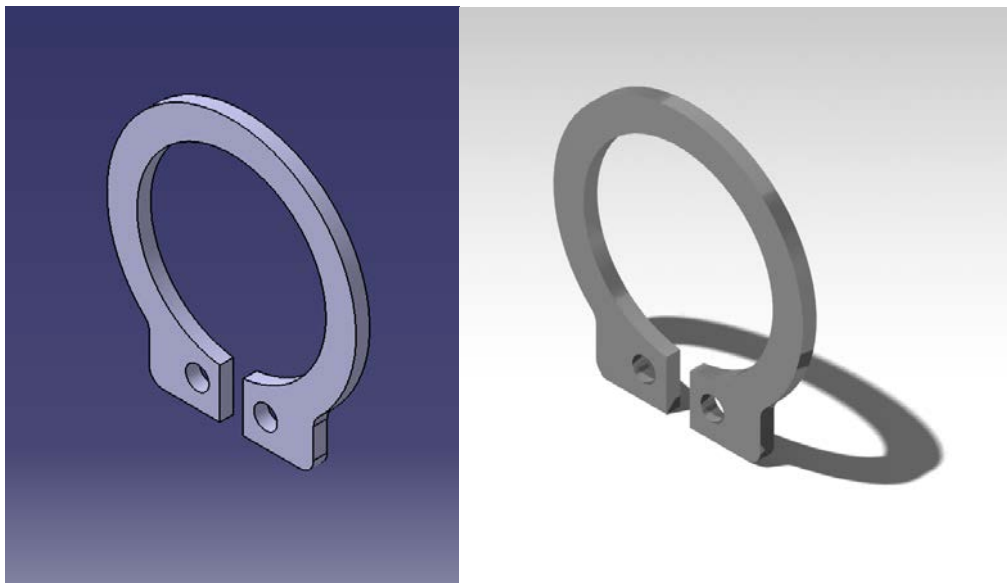


Figura 4.93 Modelo Part 54 en Catia V5.

4.2.13 Part 54a. Shaft locking clip shim, 3 mm

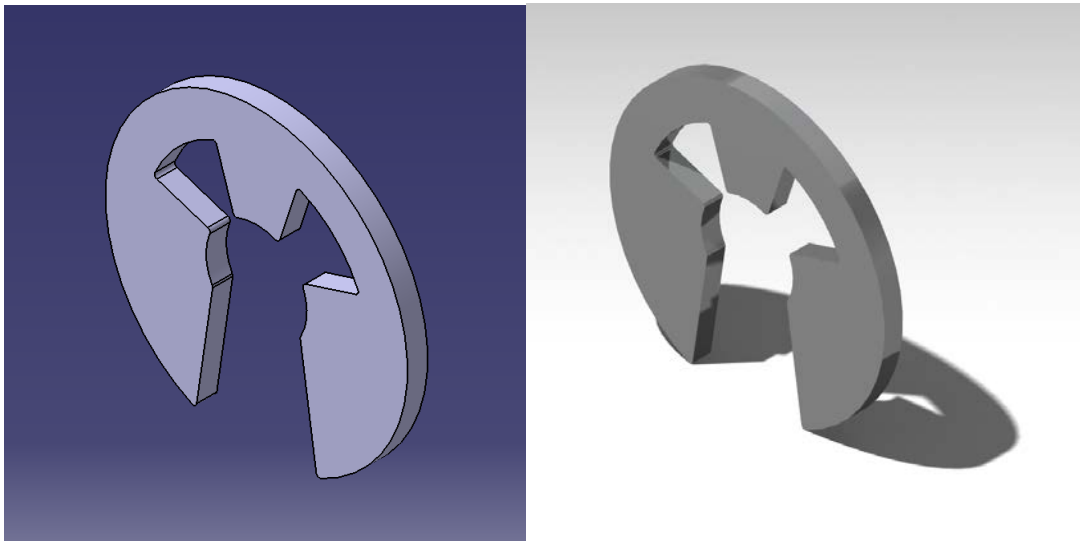


Figura 4.94 Modelo Part 54a en Catia V5.

4.2.14 Part 55. Shaft locking clip shim, 4 mm

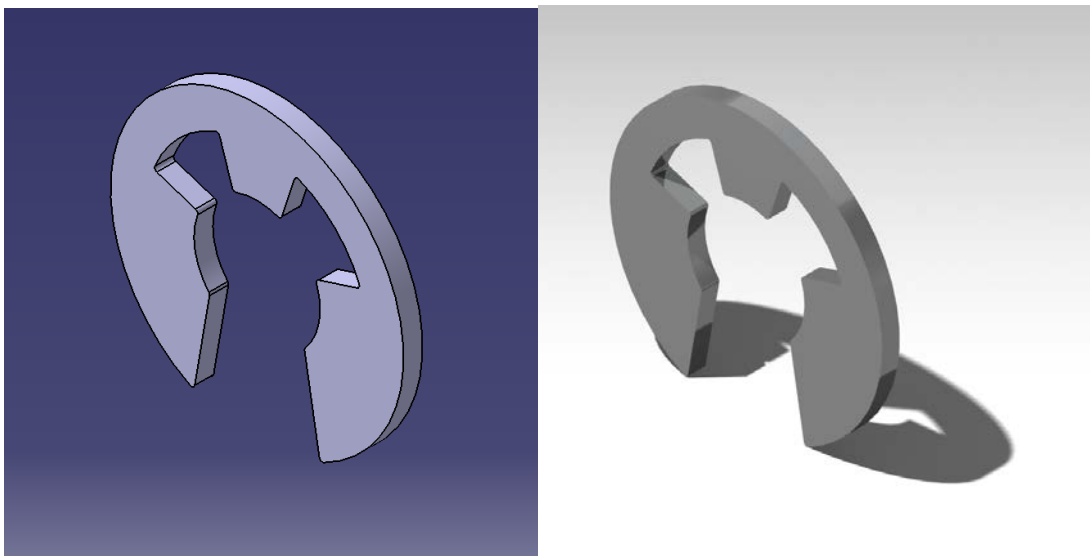


Figura 4.95 Modelo Part 55 en Catia V5.

4.2.15 Part 56. Shaft locking clip shim, 10 mm

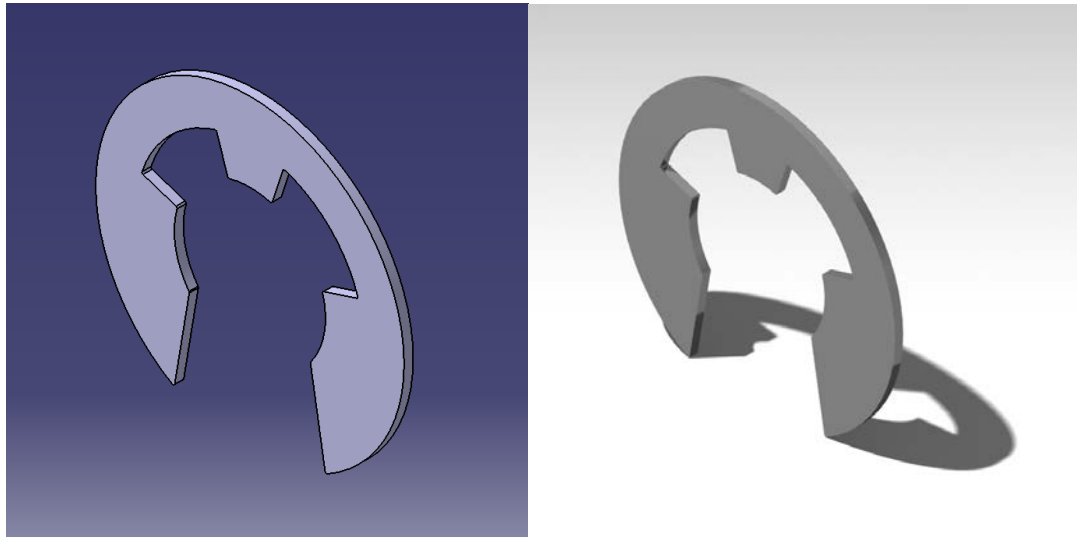


Figura 4.96 Modelo Part 56 en Catia V5.

4.3 Modelado y renderizado de las Company Parts

4.3.1 Part 21. Bearing 6001-2RS

La principal función de un rodamiento es la de facilitar el movimiento relativo controlado entre dos o más partes. En este caso particular el objetivo es lograr facilitar el movimiento rotativo del eje para hacer que éste presente la mínima fricción posible y así evitar el desgaste.

El modelo 3D de esta pieza se ha obtenido directamente de la empresa especializada que la fabrica. [26]

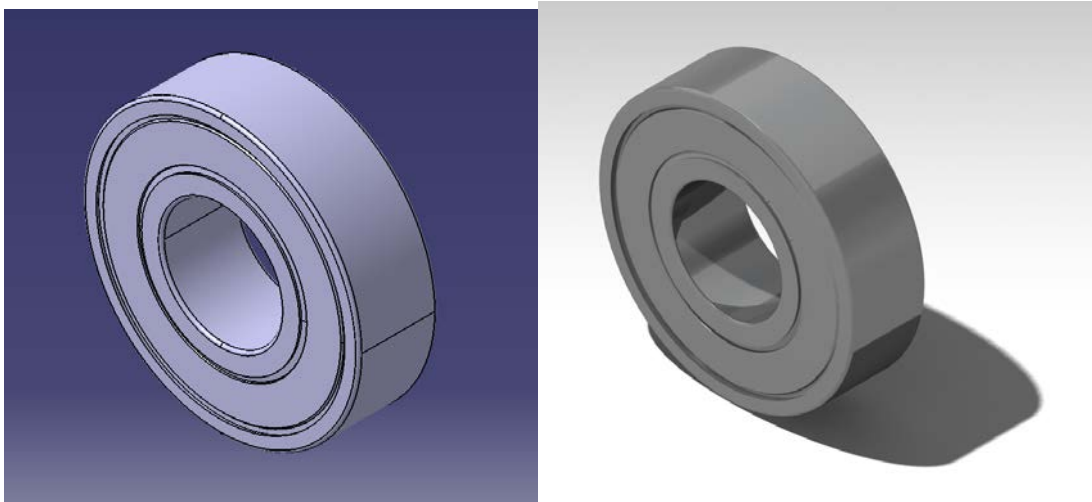


Figura 4.97 Modelo Part 21 en Catia V5.

4.3.2 Part 22. Bearing 6003-2RS

Tanto la función como el modelado son completamente análogos a la pieza anterior. [27]

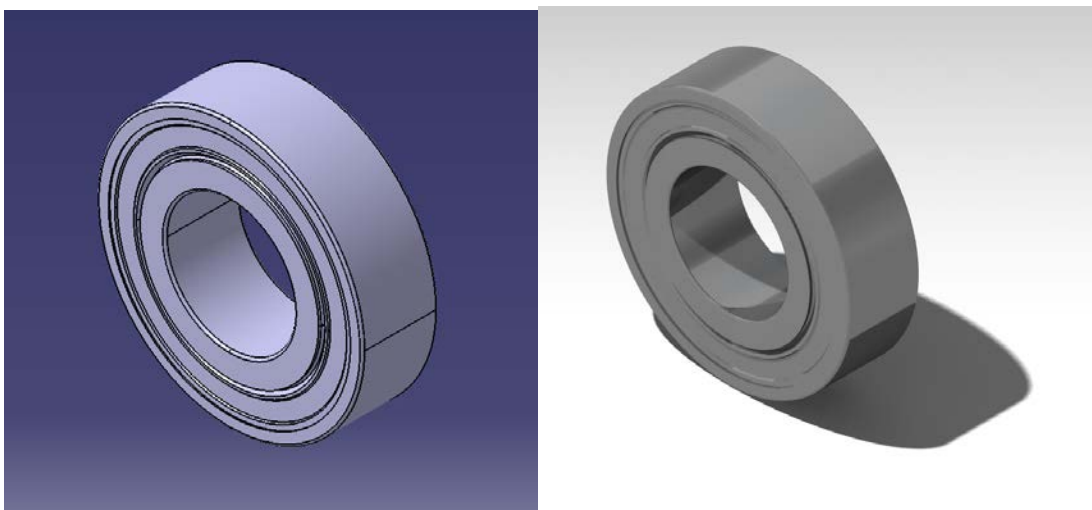


Figura 4.98 Modelo Part 22 en Catia V5.

4.3.3 Part 23. Bearing Double Row 4202B TVH

Tanto la función como el modelado son completamente análogos a la pieza anterior. [28]

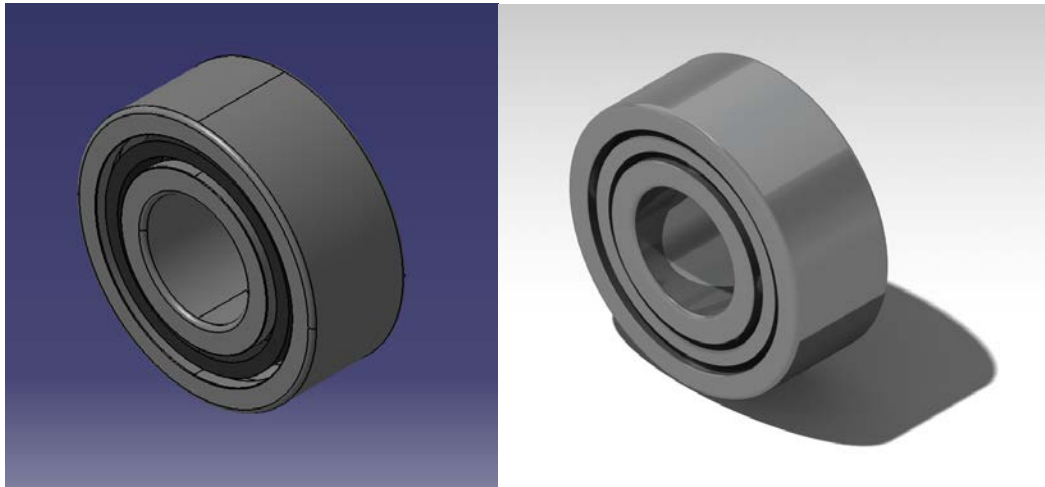


Figura 4.99 Modelo Part 23 en Catia V5.

4.3.4 Part 25. Needle Bearing NA4901

Tanto la función como el modelado son completamente análogos a los rodamientos comentados anteriormente. [29]

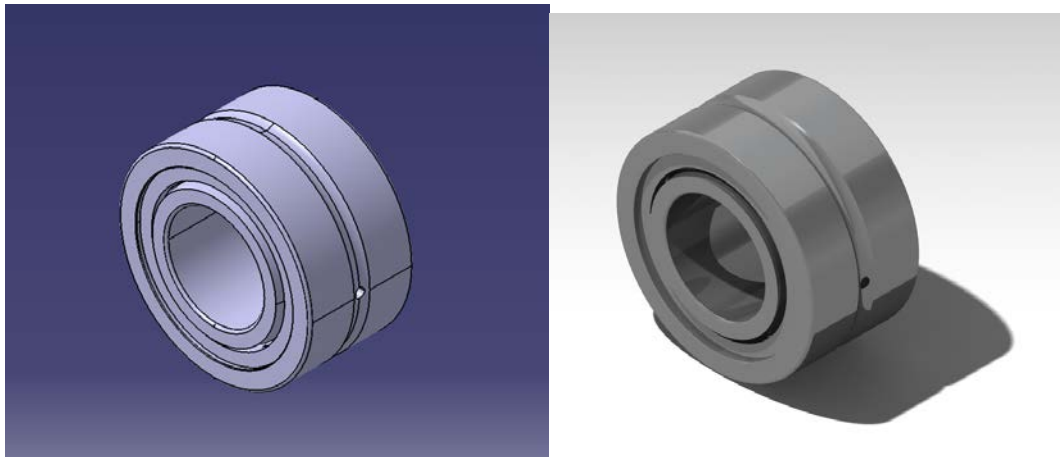


Figura 4.100 Modelo Part 25 en Catia V5.

4.3.5 Part 48. Push rod

La principal función de la varilla de empuje es la de transmitir el movimiento de los seguidores de las levas a los balancines que controlan la apertura y el cierre de las válvulas de admisión y escape. Para su modelado en Catia V5 se ha empleado la herramienta **Shaft** que permite realizar sólidos de revolución a partir del **Sketch** asociado.

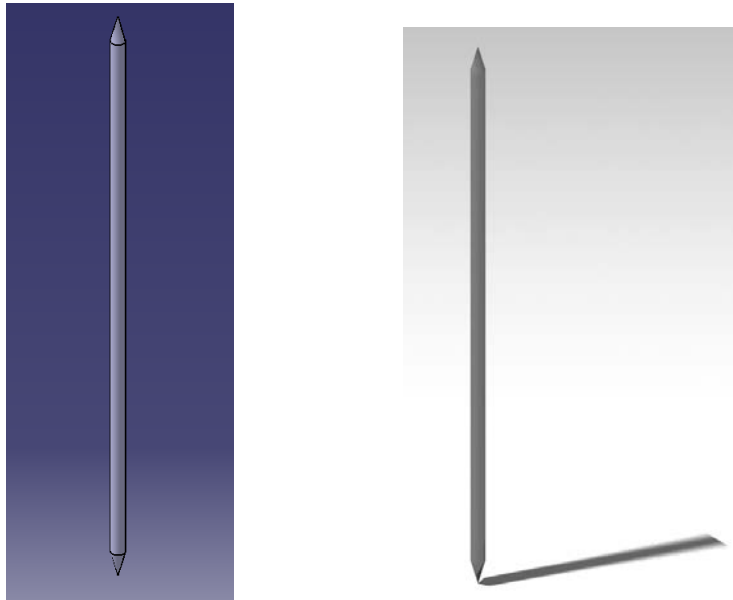


Figura 4.101 Modelo Part 48 en Catia V5.

4.3.6 Part 50. Valve spring

La principal función de los muelles de las válvulas de admisión y escape es la de comprimirse con la apertura de la válvula correspondiente para, una vez liberada la fuerza de apertura, expandirse y devolver la válvula a su posición cerrada.

El modelo 3D de esta pieza se ha obtenido directamente de la empresa especializada que la fabrica. [30]

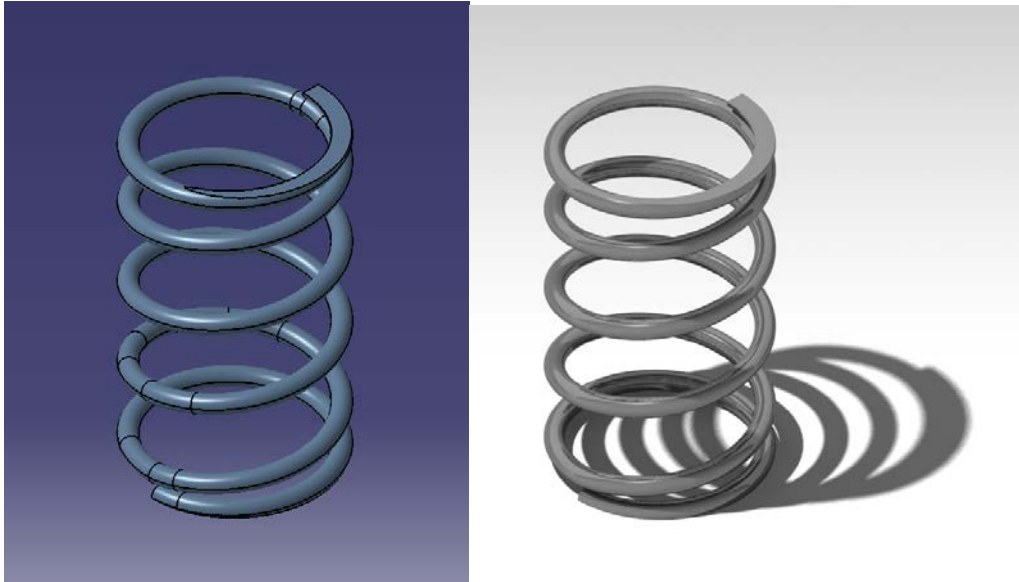


Figura 4.102 Modelo Part 50 en Catia V5.

4.3.7 Part 63. Cylinder head gasket

La principal función de la junta de la culata es la de sellar los cilindros (cámaras de combustión). La junta de culata asegura un sellado hermético esencial para mantener la presión de combustión dentro de los cilindros, evitando que los gases de combustión se escapen y garantizando la eficiencia del motor.

Para su modelado en Catia V5 se ha empleado la herramienta **Pad** que nos permite realizar extrusiones a partir de un **Sketch**.

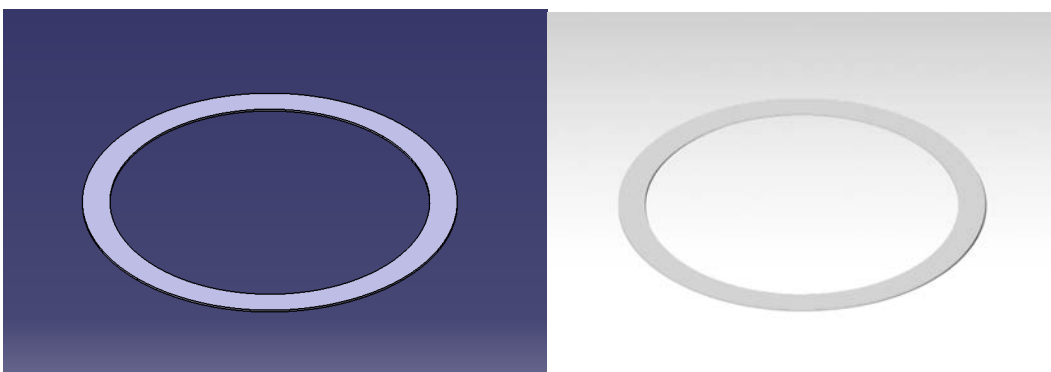


Figura 4.103 Modelo Part 63 en Catia V5.

5 Resultado final del modelado y renderizado

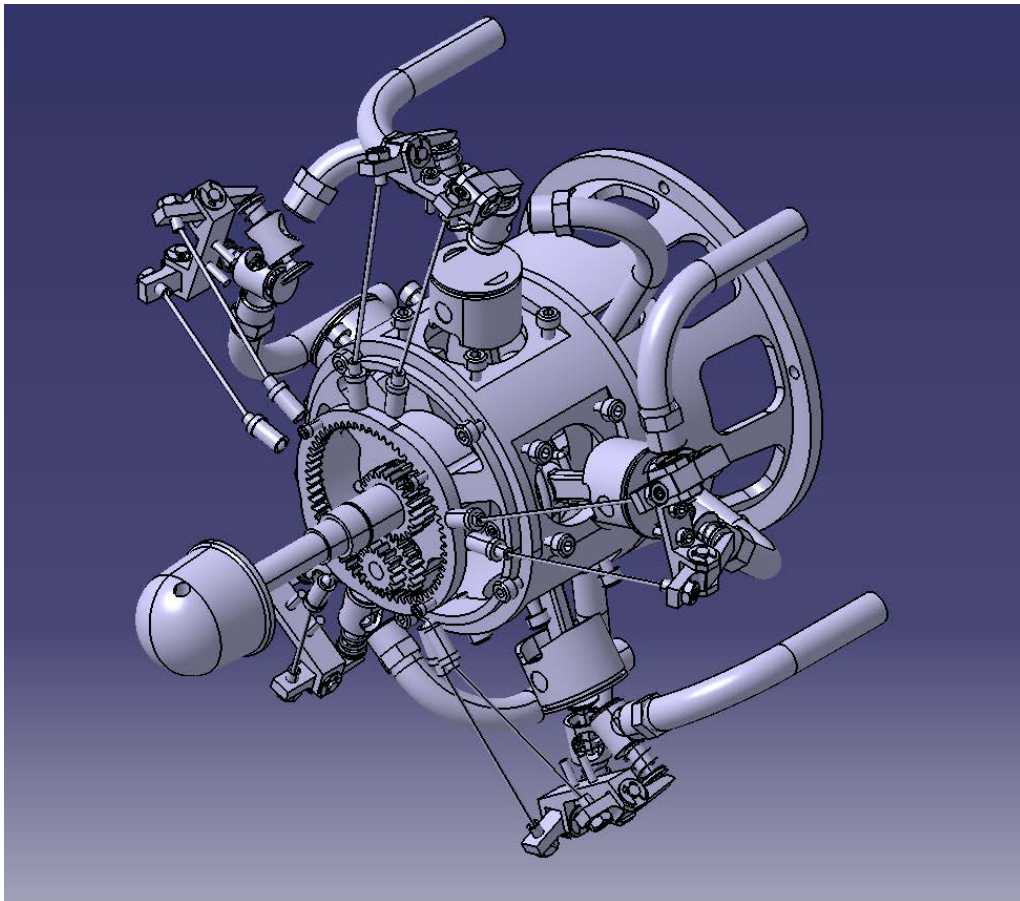


Figura 5.1 Vista isométrica del ensamblaje final (interior) en Catia V5.

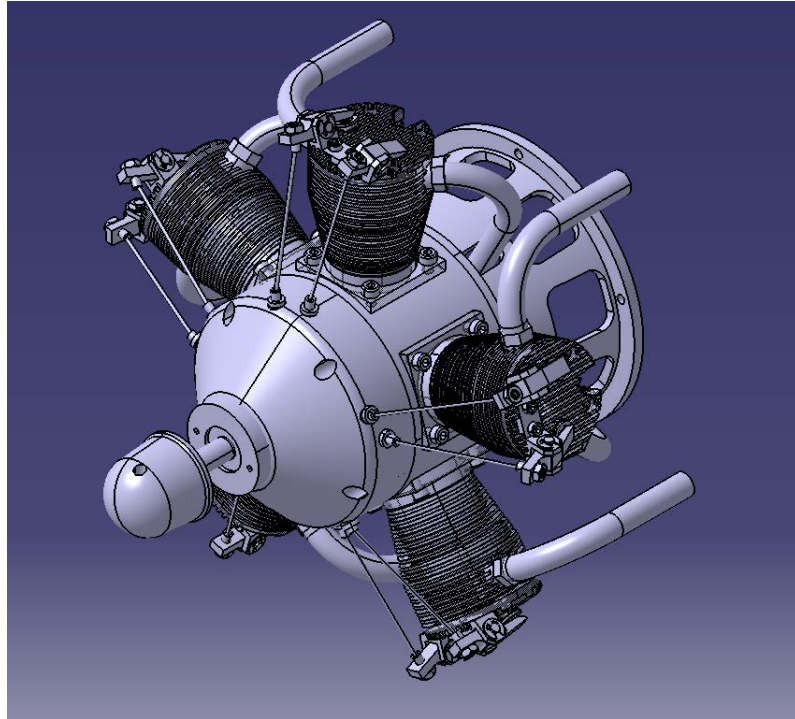


Figura 5.2 Vista isométrica del ensamblaje final en Catia V5.

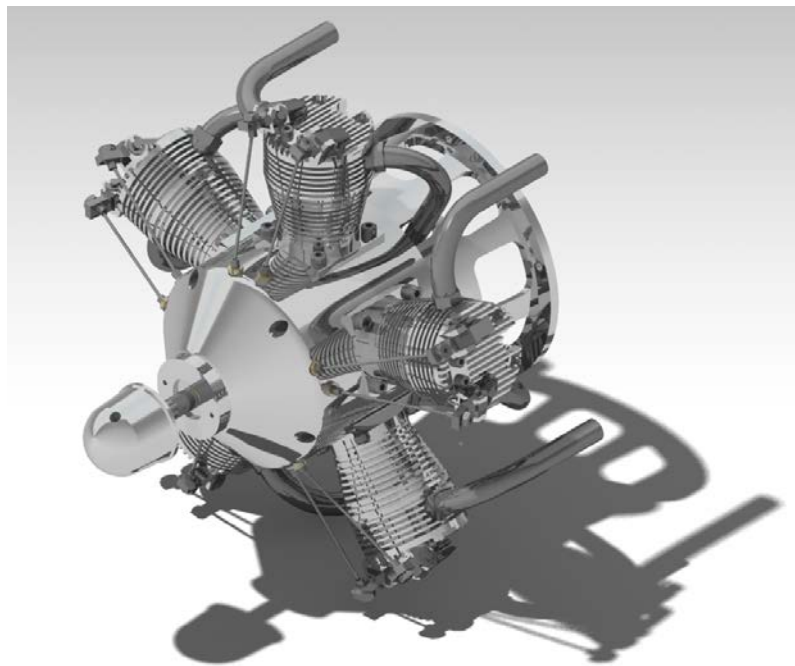


Figura 5.3 Vista isométrica del ensamblaje final renderizado en Catia V5.

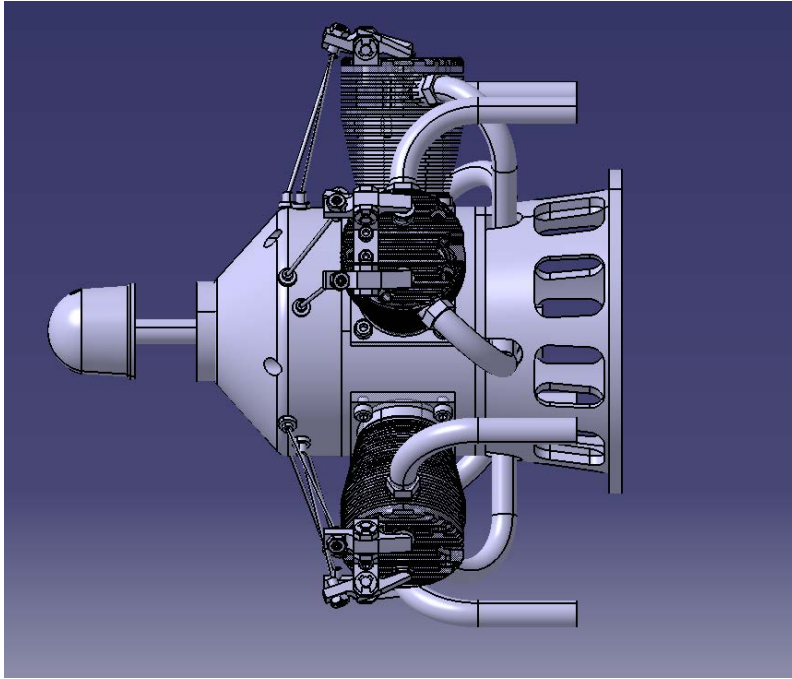


Figura 5.4 Vista lateral del ensamblaje final en Catia V5.

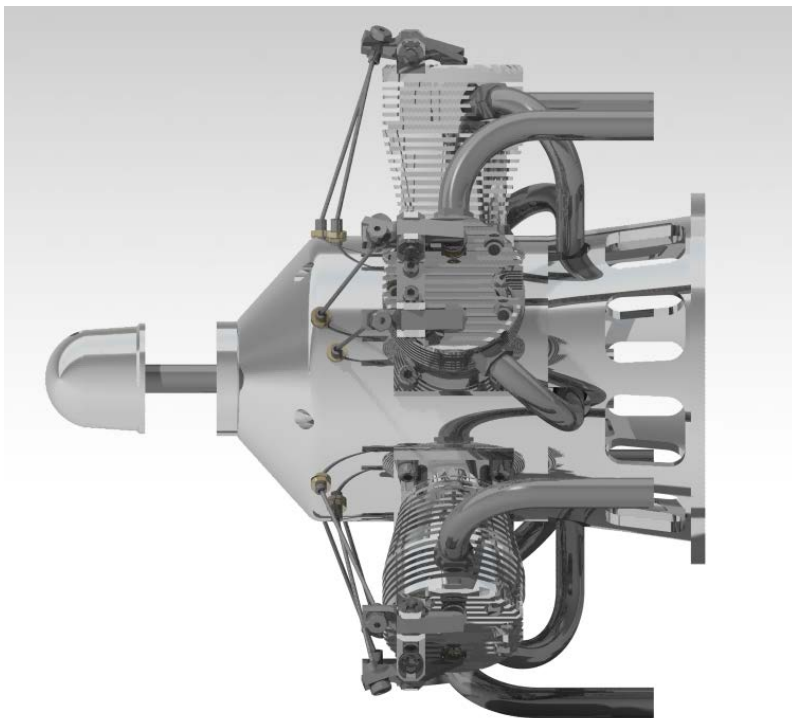


Figura 5.5 Vista lateral del ensamblaje final renderizado en Catia V5.

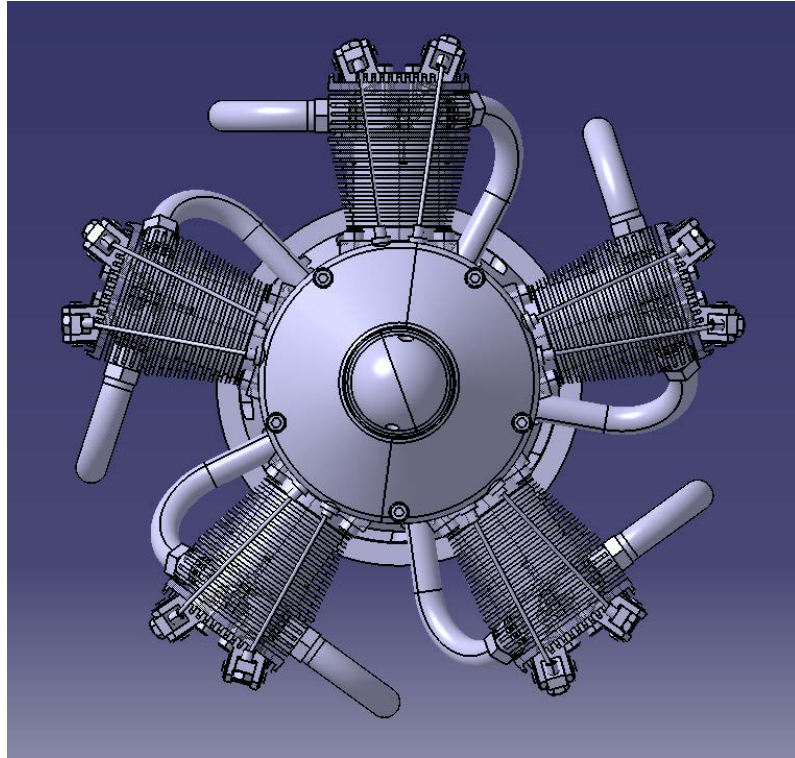


Figura 5.6 Vista frontal del ensamblaje final en Catia V5.

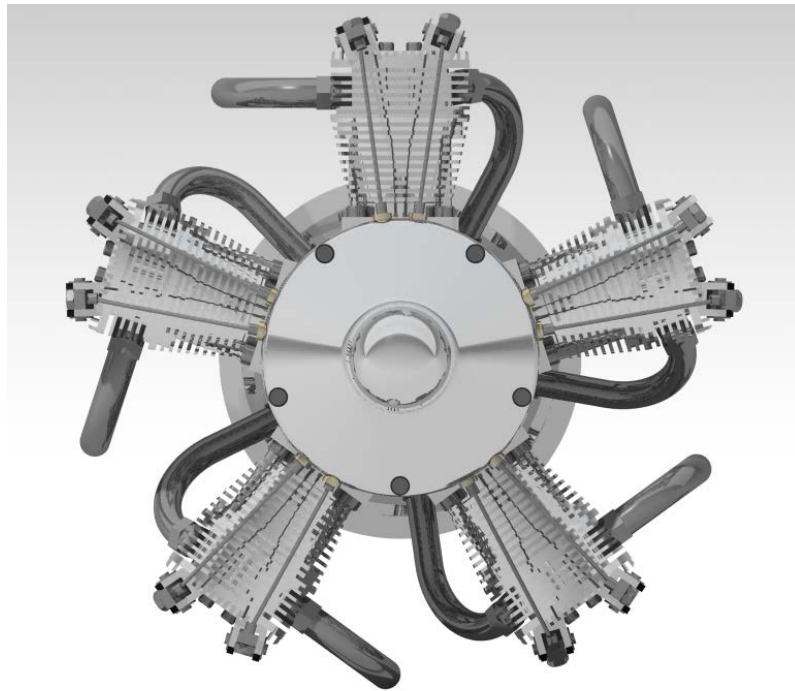


Figura 5.7 Vista frontal del ensamblaje final renderizado en Catia V5.

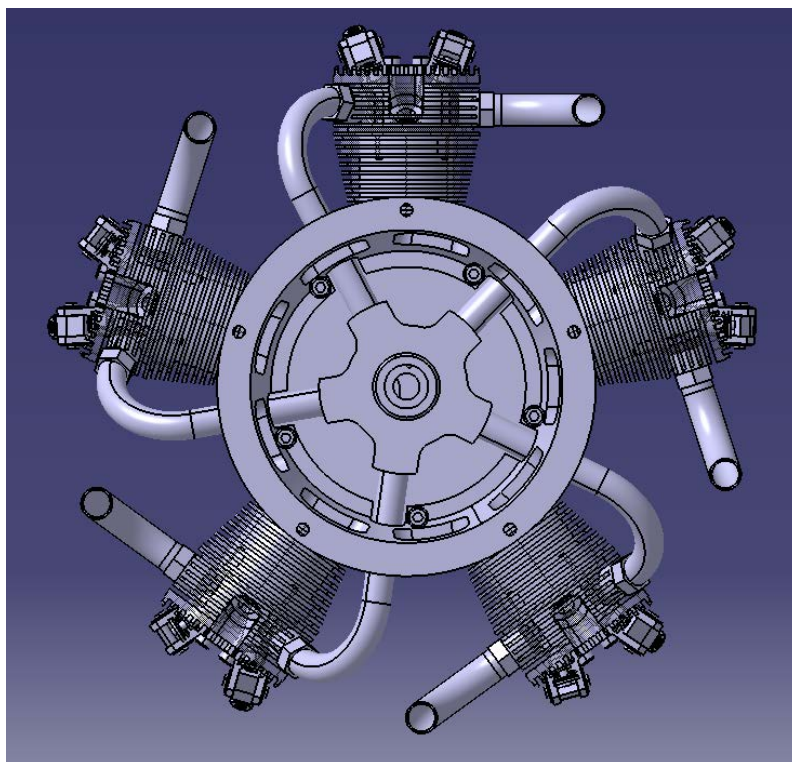


Figura 5.8 Vista trasera del ensamblaje final en Catia V5.

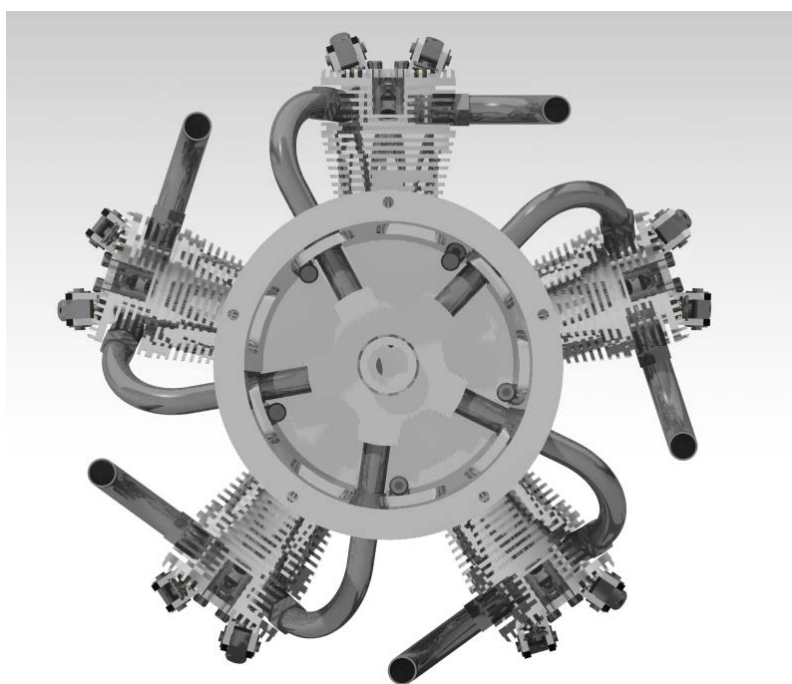


Figura 5.9 Vista trasera del ensamblaje final renderizado en Catia V5.

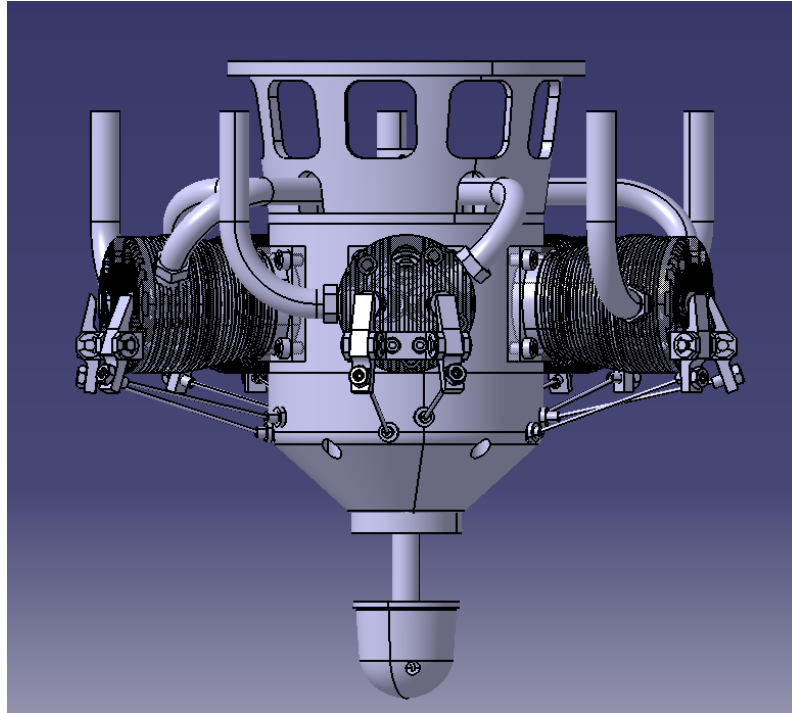


Figura 5.10 Vista en planta del ensamblaje final en Catia V5.

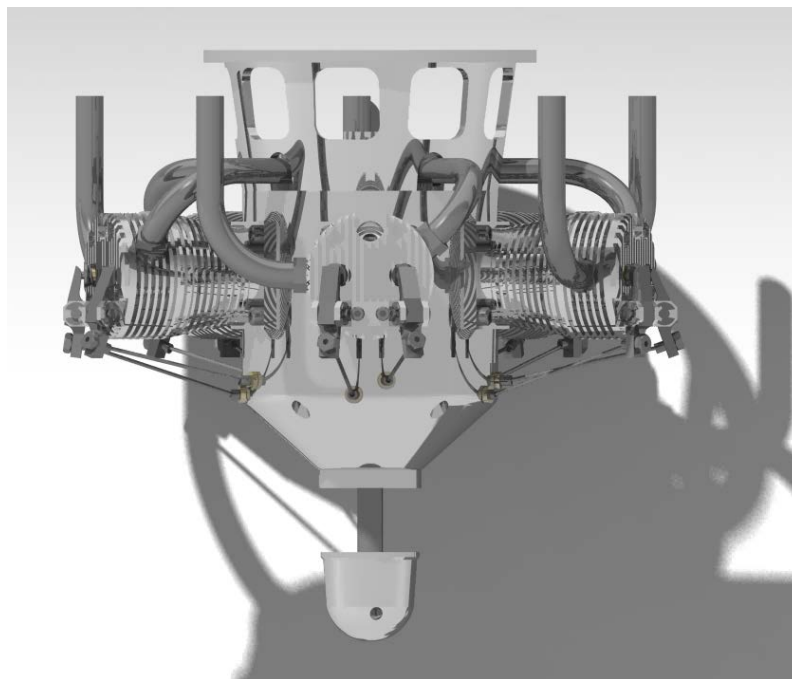


Figura 5.11 Vista en planta del ensamblaje final renderizado en Catia V5.

6 Estudio de la cinemática del motor

Tras completar el proceso de modelado y ensamblaje del motor se ha decidido realizar la recreación virtual del movimiento del mismo. Para lograr esto se ha empleado el módulo **DMU Kinematics** de **Digital Mockup** en CATIA V5 cuyas principales funcionalidades ya se han introducido previamente. En primer lugar, se parte de un conjunto previamente ensamblado y correctamente posicionado en el módulo de **Assembly Design**. Una vez hecho esto, y teniendo todos los componentes del motor posicionados correctamente, se ha procedido a eliminar todas las restricciones impuestas en dicho módulo, dado que estas podrían interferir o ser redundantes con las que se imponen en el módulo **DMU Kinematics**.

A continuación, se ha procedido a fijar el elemento base del mecanismo que en este caso se trata del bloque motor. Al realizar dicha fijación, automáticamente se crea un mecanismo al cual se le tendrán que imponer las restricciones convenientes.

En lo referente a la imposición de restricciones, se ha seguido el siguiente proceso:

- Primeramente, se establece una **Rigid Joint** (unión rígida) entre aquellos componentes que no participan en el movimiento del mecanismo.

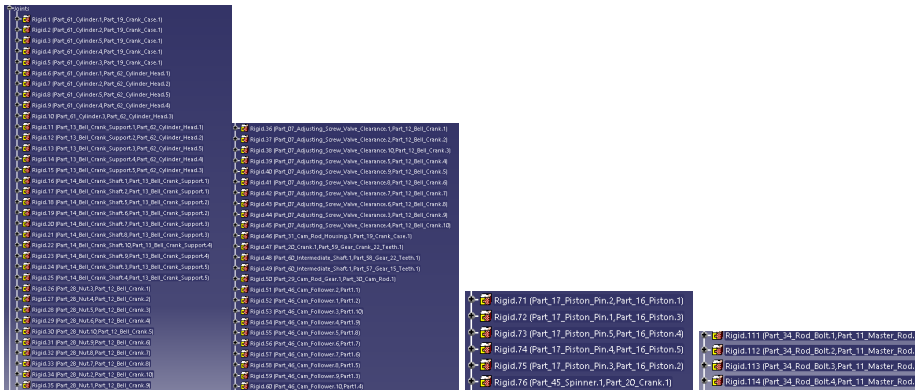


Figura 6.1 Rigid Joints.

- Después, se imponen las coincidencias de ejes necesarias con la orden **Cylindrical Joint**.



Figura 6.2 Cylindrical Joints.

- Posteriormente, se crean las restricciones de revolución entre elementos por medio del acoplamiento entre sus ejes y la fijación de la distancia entre planos de los mismos a través de la orden **Revolute Joint**.

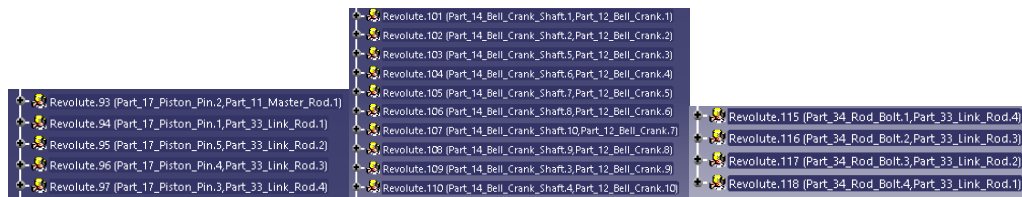


Figura 6.3 Revolute Joints.

- A continuación, se impone el contacto entre uno de los seguidores de levas y el plato de levas a través de la orden **Surface Contact**. En esta fase, cabe resaltar que únicamente se ha podido imponer esta restricción en uno de los diez puesto que ha existido un problema de interferencia entre contacto de superficies al tratar de poner en contacto más de un seguidor de leva con su plato correspondiente. Los otros nueve seguidores de leva se han fijado por medio del posicionamiento rígido.

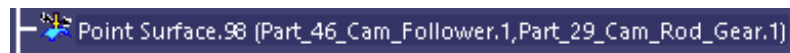


Figura 6.4 Point Surface Joint.

- El contacto entre las varillas de empuje y los tornillos que van unidos a los balancines se ha establecido con la orden **Spherical Joint**.



Figura 6.5 Spherical joints.

- Finalmente, para conseguir reproducir el comportamiento de los engranajes que intervienen en el mecanismo se ha hecho uso de la orden **Gear Joint**.

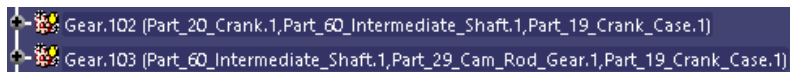


Figura 6.6 Gear joints.

Una vez impuestas todas las restricciones cinématicas mencionadas se ha creado una simulación del movimiento del motor y se ha grabado un vídeo de la misma. Dicho vídeo se adjuntará junto a la presente memoria y se mostrará durante la defensa del presente proyecto.

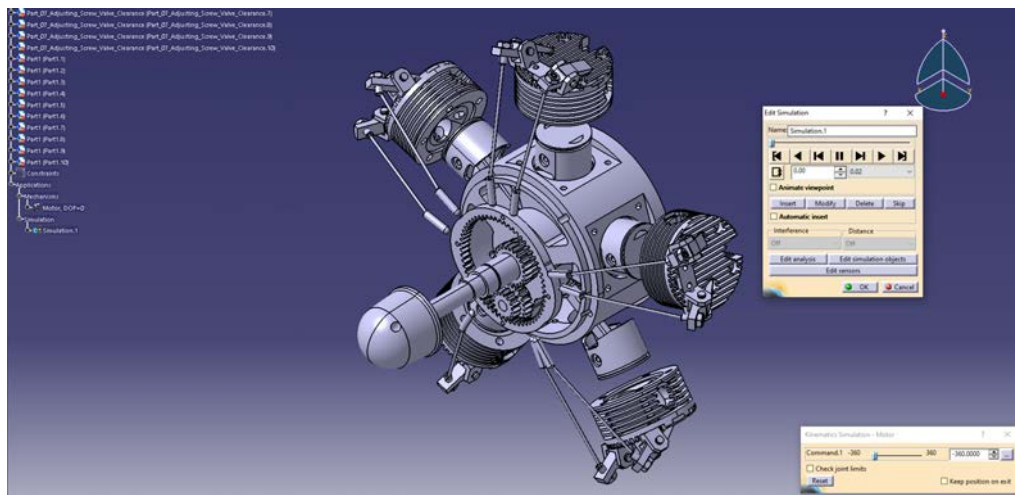


Figura 6.7 Simulación final.

7 Conclusiones

El presente trabajo de fin de máster ha tenido como objetivo principal el estudio, modelado y recreación virtual de un motor radial de 5 cilindros empleando el software CATIA V5. A lo largo de este proyecto, se han alcanzado una serie de hitos importantes que han permitido cumplir con los objetivos propuestos, aportando tanto conocimientos técnicos específicos como competencias en el uso avanzado de herramientas de diseño asistido por ordenador.

En primer lugar, se ha llevado a cabo un análisis detallado del funcionamiento y la estructura de los motores radiales de combustión interna, destacando su importancia histórica y su aplicación en la aviación. Este análisis ha proporcionado una base teórica sólida que ha servido de guía para el proceso de modelado seguido a posteriori.

El modelado del motor en CATIA V5 ha supuesto todo un reto, dada la complejidad de algunos de sus componentes así como de su posterior ensamblaje. Esta parte del proyecto ha permitido profundizar en el uso de algunos módulos de CATIA V5, más concretamente en el uso de los módulos de Part Design y Assembly Design. Finalmente, la recreación virtual del motor ha permitido visualizar su funcionamiento, facilitando la comprensión de su mecánica. Dicha recreación virtual ha permitido profundizar en el módulo de cinemática de CATIA V5 (DMU Kinematics).

Resaltar que, como pasos futuros, sería conveniente profundizar más en el motivo que ha impedido realizar la simulación cinemática del movimiento de los balancines en contacto con los platos de levas (problema de interferencias en contactos en los que intervienen varias superficies). Adicionalmente, otra mejora que podría implementarse posteriormente en este proyecto es la realización de un renderizado de los distintos componentes así como del ensamblaje final más realista haciendo uso de softwares dedicados especialmente a este tipo de tareas como por ejemplo Keyshot.

En resumen, en el presente proyecto se ha logrado modelar y recrear virtualmente un motor radial de 5 cilindros, demostrando la capacidad que presenta el programa CATIA V5 para abordar este tipo de problemas.

Apéndice A

Cálculo de engranajes

En los planos de los distintos engranajes presentes en el motor se tienen como datos tanto el módulo como el número de dientes de los mismos. Adicionalmente, se fija el ángulo de presión de los engranajes en 20 grados (valor típico) para poder calcular una serie de datos geométricos que permiten el modelado en CATIA V5 de los mismos. El proceso de cálculo que se ha seguido viene del vídeo [31].

Definición de los parámetros geométricos de los engranajes:

- Módulo (M).
- Número de dientes (Z).
- Ángulo de presión (α).
- Paso circunferencial ($P_c = \pi \cdot M$)
- Altura del diente ($H = 2.167 \cdot M$)
- Altura de la cabeza del diente ($H_c = 1 \cdot M$)
- Altura de la raíz del diente ($H_r = 1.167 \cdot M$)
- Ancho del diente ($E = P_c/2$)
- Diámetro primitivo ($\phi P = M \cdot Z$)
- Diámetro exterior ($\phi E = \phi P + 2 \cdot H_c$)
- Diámetro fondo ($\phi F = \phi P - 2 \cdot H_r$)
- Radio al fondo ($R = 0.167 \cdot M$)

Aplicando estas fórmulas en los distintos engranajes se han obtenido los siguientes valores para cada uno de los mismos:

A.1 Part 57

Datos de partida:

- $M = 1$
- $Z = 15$
- $\alpha = 20$

Parámetros geométricos calculados (todo en mm):

- $P_c = \pi$
- $H = 2.167$
- $H_c = 1$
- $H_r = 1.167$
- $E = \pi/2$
- $\phi P = 15$
- $\phi E = 17$
- $\phi F = 12.66$
- $R = 0.167$

A.2 Part 58

Datos de partida:

- $M = 1$
- $Z = 22$
- $\alpha = 20$

Parámetros geométricos calculados (todo en mm):

- $P_c = \pi$
- $H = 2.167$
- $H_c = 1$
- $H_r = 1.167$
- $E = \pi/2$
- $\phi P = 22$
- $\phi E = 24$
- $\phi F = 19.66$
- $R = 0.167$

A.3 Part 59

Datos de partida:

- $M = 1$
- $Z = 22$
- $\alpha = 20$

Parámetros geométricos calculados (todo en mm):

- $P_c = \pi$

- $H = 2.167$
- $H_c = 1$
- $H_r = 1.167$
- $E = \pi/2$
- $\phi P = 22$
- $\phi E = 24$
- $\phi F = 19.66$
- $R = 0.167$

A.4 Part 29

Datos de partida:

- $M = 1$
- $Z = 60$
- $\alpha = 20$

Parámetros geométricos calculados (todo en mm):

- $P_c = \pi$
- $H = 2.167$
- $H_c = 1$
- $H_r = 1.167$
- $E = \pi/2$
- $\phi P = 60$
- $\phi E = 62$
- $\phi F = 57.66$
- $R = 0.167$

Índice de Figuras

2.1	Vehículo de tracción animal [1]	3
2.2	Philippe Lebon [2]	3
2.3	Jean Joseph Etienne Lenoir [3]	4
2.4	Nikolaus Otto [4]	4
2.5	Ciclo de Otto [6]	5
2.6	Rudolf Diesel [7]	6
2.7	Henry Ford [8]	6
2.8	Combustión VS Eléctrico [9]	6
2.9	Cilindro [10]	7
2.10	Pistón [11]	7
2.11	Biela [12]	8
2.12	Cigüeñal [13]	8
2.13	Válvula [14]	8
2.14	Bujía [15]	9
2.15	Carburador [16]	9
2.16	Colector de escape [17]	10
2.17	Motor en línea [18]	10
2.18	Motor en V [19]	11
2.19	Motor plano [19]	11
2.20	Motor rotativo [20]	11
2.21	Motor radial [21]	12
2.22	Avioneta de aerodelismo con motor radial [22]	12
3.1	Logo de CATIA [24]	13
4.1	Bill of material 1	18
4.2	Bill of material 2	18
4.3	Plano Part 01	19
4.4	Modelo Part 01 en Catia V5	19
4.5	Plano Part 02	20
4.6	Modelo Part 02 en Catia V5	20
4.7	Plano Part 03	21
4.8	Modelo Part 03 en Catia V5	21
4.9	Plano Part 05	22
4.10	Modelo Part 05 en Catia V5	22
4.11	Plano Part 06	23

4.12	Modelo Part 06 en Catia V5	23
4.13	Plano Part 08	24
4.14	Modelo Part 08 en Catia V5	24
4.15	Plano Part 11	25
4.16	Modelo Part 11 en Catia V5	25
4.17	Plano Part 12	26
4.18	Modelo Part 12 en Catia V5	26
4.19	Plano Part 13	27
4.20	Modelo Part 13 en Catia V5	27
4.21	Plano Part 14	28
4.22	Modelo Part 14 en Catia V5	28
4.23	Plano Part 15	29
4.24	Modelo Part 15 en Catia V5	29
4.25	Plano Part 16	30
4.26	Modelo Part 16 en Catia V5	30
4.27	Plano Part 17	31
4.28	Modelo Part 17 en Catia V5	31
4.29	Plano Part 17a	32
4.30	Modelo Part 17a en Catia V5	32
4.31	Plano Part 18	33
4.32	Modelo Part 18 en Catia V5	33
4.33	Planos Part 19	34
4.34	Modelo Part 19 en Catia V5	34
4.35	Plano Part 20	35
4.36	Modelo Part 20 en Catia V5	35
4.37	Plano Part 24	36
4.38	Modelo Part 24 en Catia V5	36
4.39	Planos Part 27	37
4.40	Modelo Part 27 en Catia V5	37
4.41	Plano Part 29	38
4.42	Modelo Part 29 en Catia V5	38
4.43	Plano Part 30	39
4.44	Modelo Part 30 en Catia V5	39
4.45	Plano Part 31	40
4.46	Modelo Part 31 en Catia V5	40
4.47	Plano Part 33	41
4.48	Modelo Part 33 en Catia V5	41
4.49	Plano Part 34	42
4.50	Modelo Part 34 en Catia V5	42
4.51	Plano Part 35	43
4.52	Modelo Part 35 en Catia V5	43
4.53	Plano Part 36	44
4.54	Modelo Part 36 en Catia V5	44
4.55	Plano Part 45	45
4.56	Modelo Part 45 en Catia V5	45
4.57	Plano Part 46	46
4.58	Modelo Part 46 en Catia V5	46
4.59	Plano Part 47	47
4.60	Modelo Part 47 en Catia V5	47
4.61	Plano Part 49	48

4.62	Modelo Part 49 en Catia V5	48
4.63	Plano Part 51	49
4.64	Modelo Part 51 en Catia V5	49
4.65	Plano Part 53	50
4.66	Modelo Part 53 en Catia V5	50
4.67	Plano Parts 57,58 y 60	51
4.68	Modelo Part 57 en Catia V5	51
4.69	Plano Parts 57,58 y 60	52
4.70	Modelo Part 58 en Catia V5	52
4.71	Plano Part 59	53
4.72	Modelo Part 59 en Catia V5	53
4.73	Plano Parts 57,58 y 60	54
4.74	Modelo Part 60 en Catia V5	54
4.75	Plano Part 61	55
4.76	Modelo Part 61 en Catia V5	55
4.77	Planos Part 62	56
4.78	Plano Part 62	56
4.79	Modelo Part 62 en Catia V5	56
4.80	Plano Part 64	57
4.81	Modelo Part 64 en Catia V5	57
4.82	Modelo Part 07 en Catia V5	58
4.83	Modelo Part 26 en Catia V5	58
4.84	Modelo Part 28 en Catia V5	59
4.85	Modelo Part 32 en Catia V5	59
4.86	Modelo Part 37 en Catia V5	60
4.87	Modelo Part 38 en Catia V5	60
4.88	Modelo Part 39 en Catia V5	61
4.89	Modelo Part 40 en Catia V5	61
4.90	Modelo Part 41 en Catia V5	62
4.91	Modelo Part 42 en Catia V5	62
4.92	Modelo Part 43 en Catia V5	63
4.93	Modelo Part 54 en Catia V5	63
4.94	Modelo Part 54a en Catia V5	64
4.95	Modelo Part 55 en Catia V5	64
4.96	Modelo Part 56 en Catia V5	65
4.97	Modelo Part 21 en Catia V5	66
4.98	Modelo Part 22 en Catia V5	66
4.99	Modelo Part 23 en Catia V5	67
4.100	Modelo Part 25 en Catia V5	67
4.101	Modelo Part 48 en Catia V5	68
4.102	Modelo Part 50 en Catia V5	69
4.103	Modelo Part 63 en Catia V5	69
5.1	Vista isométrica del ensamblaje final (interior) en Catia V5	71
5.2	Vista isométrica del ensamblaje final en Catia V5	72
5.3	Vista isométrica del ensamblaje final renderizado en Catia V5	72
5.4	Vista lateral del ensamblaje final en Catia V5	73
5.5	Vista lateral del ensamblaje final renderizado en Catia V5	73
5.6	Vista frontal del ensamblaje final en Catia V5	74
5.7	Vista frontal del ensamblaje final renderizado en Catia V5	74

5.8	Vista trasera del ensamblaje final en Catia V5	75
5.9	Vista trasera del ensamblaje final renderizado en Catia V5	75
5.10	Vista en planta del ensamblaje final en Catia V5	76
5.11	Vista en planta del ensamblaje final renderizado en Catia V5	76
6.1	Rigid Joints	77
6.2	Cylindrical Joints	78
6.3	Revolute Joints	78
6.4	Point Surface Joint	78
6.5	Spherical joints	79
6.6	Gear joints	79
6.7	Simulación final	79

Bibliografía

- [1] Carroya, “Oficial: Los vehículos de tracción animal quedarán prohibidos en colombia,” 2024, accessed: 2024-06-20. [Online]. Available: <https://www.carroya.com/noticias/noticias-y-lanzamientos/oficial-los-vehiculos-de-traccion-animal-quedaran-prohibidos-en-colombia>
- [2] Wikipedia, “Philippe lebon,” 2024, accessed: 2024-06-20. [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Philippe_Lebon
- [3] —, “Étienne lenoir,” 2024, accessed: 2024-06-20. [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%89tienne_Lenoir
- [4] —, “Nicolaus otto,” 2024, accessed: 2024-06-20. [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Nicolaus_Otto
- [5] Wikipedia contributors, “Ciclo de cuatro tiempos — Wikipedia, La enciclopedia libre,” 2024, [En línea; acceso 2-julio-2024]. [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_de_cuatro_tiempos
- [6] Motoborda, “Funcionamiento de los motores 4 tiempos,” 2024, accessed: 2024-06-20. [Online]. Available: <https://motoborda.com/blog/funcionamiento-de-los-motores-4-tiempos-b39.html>
- [7] Wikipedia, “Rudolf diesel,” 2024, accessed: 2024-06-20. [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Rudolf_Diesel
- [8] —, “Henry ford,” 2024, accessed: 2024-06-20. [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Henry_Ford
- [9] LeasePlan, “Coche de combustión vs coche eléctrico: ¿quién gana?” 2024, accessed: 2024-06-20. [Online]. Available: <https://www.leaseplango.es/blog/comparativa/coche-combustion-vs-coche-electrico-gana/>
- [10] Yenmak, “Revestimientos de cilindro refrigeradas por aire,” 2024, accessed: 2024-06-20. [Online]. Available: <https://yenmak.com.tr/es/productos/revestimientos-de-cilindro-refrigeradas-por-aire-514>
- [11] Wikipedia, “Pistón,” 2024, accessed: 2024-06-20. [Online]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Pist%C3%B3n>
- [12] Motociclismo, “Biela del motor: ¿cuál es su función?” 2024, accessed: 2024-06-20. [Online]. Available: https://www.motociclismo.es/consejos/mantenimiento/biela-motor-cual-es-su-funcion-ecn_277511_102.html

- [13] Coches.com, “Cigüeñal del motor,” 2024, accessed: 2024-06-20. [Online]. Available: <https://noticias coches.com/consejos/ciguenal-motor/401352>
- [14] Ro Madrid Car, “Válvulas de admisión,” 2024, accessed: 2024-06-20. [Online]. Available: <https://www.romadridcar.com/noticias/valvulas-de-admision/>
- [15] Wikipedia, “Bujía,” 2024, accessed: 2024-06-20. [Online]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Buj%C3%ADa>
- [16] EPS Formación, “Funcionamiento de carburadores i,” 2024, accessed: 2024-06-20. [Online]. Available: <https://epsformacion.com/blog/funcionamiento-carburadores-i/>
- [17] Ro-Des, “¿qué es el colector de escape y para qué sirve?” 2024, accessed: 2024-06-20. [Online]. Available: <https://www.ro-des.com/mecanica/que-es-colector-de-escape-para-que-sirve/>
- [18] Wikipedia, “Motor de cuatro cilindros en línea,” 2024, accessed: 2024-06-20. [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_de_cuatro_cilindros_en_l%C3%ADnea
- [19] Auto10, “Motor bóxer: ¿cómo funciona?” 2024, accessed: 2024-06-20. [Online]. Available: <https://www.auto10.com/reportajes/motor-boxer-como-funciona/2063>
- [20] Wikipedia, “Motor wankel,” 2024, accessed: 2024-06-20. [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_Wankel
- [21] KFZ Tech, “Sternmotor,” 2024, accessed: 2024-06-20. [Online]. Available: <https://www.kfz-tech.de/Spain/Biblio/Mehrzyylinder/Sternmotor.htm>
- [22] Zamora 24 Horas, “El aeromodelismo toma el cielo zamorano,” 2024, accessed: 2024-06-20. [Online]. Available: https://www.zamora24horas.com/provincia/aeromodelismo-toma-cielo-zamorano_15076365_102.html
- [23] Wikipedia contributors, “CATIA — Wikipedia, The Free Encyclopedia,” 2024, accessed: 2024-06-23. [Online]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/CATIA>
- [24] Wikimedia Commons contributors, “DS CATIA Logo,” 2024, accessed: 2024-06-23. [Online]. Available: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:DS-CATIA-Logo.png>
- [25] CAD-Modelltechnik Jung, “Baupläne für Modellmotoren,” 2024, accessed: 2024-06-23. [Online]. Available: <https://cad-modelltechnik-jung.de/bauplaene-modellmotore.html>
- [26] SKF, “Deep groove ball bearings - 6001-2rsh,” <https://www.skf.com/pe/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-6001-2RSH>, accessed: 2024-07-02.
- [27] —, “Deep groove ball bearings - w 6003-2rs1,” <https://www.skf.com/ar/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-W%206003-2RS1>, accessed: 2024-07-02.
- [28] Schaeffler, “Deep groove ball bearings - 4202-bb-tvh-c3,” <https://medias.schaeffler.es/en/product/rotary-rolling-and-plain-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/4202-bb-tvh-c3/p/356988#CAD%20Data>, accessed: 2024-07-02.
- [29] SKF, “Needle roller bearings with machined rings - na 4901,” <https://www.skf.com/sg/products/rolling-bearings/roller-bearings/needle-roller-bearings/needle-roller-bearings-with-machined-rings/productid-NA%204901>, accessed: 2024-07-02.

-
- [30] Federnshop, "Compression springs - d-123," https://www.federnshop.com/en/products/compression_springs/d-123.html, accessed: 2024-07-02.
- [31] Suprapixel, "Cómo dibujar un engranaje en 3d en autocad. cálculo y obtención de engranaje," 2024, consultado el: 25 de junio de 2024. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=fgiGTO3YqVc>