



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

Diseño de un sistema de distribución con válvulas de disco para un motor de combustión

MEMORIA PRESENTADA POR:

Francisco José Climent Bosca

GRADO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Convocatoria de defensa: Julio 2018

Agradezco la ayuda prestada y los consejos a Vicente Esquerdo como tutor de este proyecto y a Beatriz Eixeres como cotutora.

RESUMEN

Se plantea el diseño de un sistema de distribución, en el que el control de admisión y escape se realiza mediante una configuración innovadora por medio de válvulas de disco en movimiento rotacional. También se realiza una revisión de los sistemas empleados en los motores en el transcurso de la historia.

El estudio se aplica a un motor de motocicleta de 4T de gasolina, en el que se dimensionan y calculan las piezas necesarias para este nuevo sistema. Además se incluye el estudio del proceso de fabricación de los componentes y se realiza una simulación mediante software, y se fabrica una maqueta mediante impresión 3D.

Además también se plantea la posibilidad de poder aplicar este tipo de distribución por válvulas rotativas a otros tipos de motores de combustión, adaptándolo a las necesidades y características de cada motor.

Palabras Clave: motores, válvulas, distribución, válvulas rotativas, válvula admisión, válvula escape, válvulas de disco.

RESUM

Es planteja el disseny d'un sistema de distribució, en el que el control d'admissió i fuga es realitza per mitjà d'una configuració innovadora per mitjà de vàlvules de disc en moviment rotacional. També es realitza una revisió dels sistemes empleats en els motors en el transcurs de la història.

L'estudi s'aplica a un motor de motocicleta de 4T de gasolina, en el que es dimensionen i calculen les peces necessàries per a este nou sistema. A més s'inclou l'estudi del procés de fabricació dels components i es realitza una simulació per mitjà de programari, i s'ha fabricat una maqueta per mitjà d'impressió 3D.

A més també es planteja la possibilitat de poder aplicar este tipus de distribució per vàlvules rotatives a altres tipus de motors de combustió, adaptant-ho a les necessitats i característiques de cada motor.

Paraules Clau: motors, vàlvules, distribució, vàlvules rotatives, vàlvula admissió, vàlvula fuga, vàlvules de disc

SUMMARY

The design of a distribution system is proposed, in which the admission and exhaust control is performed by means of an innovative configuration by means of disc valves in rotational movement. There is also a review of the systems used in the engines in the course of history.

The study applies a 4T gasoline motorcycle engine, in which the necessary parts are dimensioned and calculated for this new system. It also includes the study of the manufacturing process of the components and makes a simulation with software, and has made a model with 3D printing.

In addition, it is also proposed to apply this type of distribution by rotary valves to other types of combustion engines, to adapt to the needs and characteristics of each engine.

Keywords: motors, valves, distribution, rotary valves, intake valve, exhaust valve, disc valves.

INDICE

1. Objetivos.....	16
2. Justificación	17
3. Introducción	18
3.1. Definiciones.....	19
3.2. Cronología de los sistemas de distribución empleados en la industria automotriz	28
3.3. Revisión cronológica de los sistemas de distribución rotativos	33
4. Descripción del sistema con válvulas rotativas	45
5. Descripción del motor original.....	46
6. Elementos del sistema de distribución	47
6.1. Cálculos justificativos.....	49
6.2. Selección de materiales.....	53
6.3. Simulación y verificación de espesores.	79
6.4. Proceso fabricación	96
6.5. Elementos originales utilizados.....	121
6.6. Ensamblaje.....	125
6.7. Comparación sistema original con el nuevo sistema.....	127
7. Condiciones de diseño.....	130
8. Planos	132
9. Pliego de condiciones	145
10. Presupuesto	147
11. Maqueta	149
11.1. Proceso fabricación.....	149
12. Conclusiones.....	154
12.1. Variantes.....	154
13. Bibliografía	156

INDICE FIGURAS

Figura 1. Motor de moto 4 tiempos Otto.....	19
Figura 2. Ciclo 4 tiempos Otto.....	20
Figura 3. Ciclo 2 tiempos Otto.....	21
Figura 4. Carburador con filtro de aire cónico.	21
Figura 5. Mariposas motor de 4 cilindros.	22
Figura 6. Bobina encendido.	22
Figura 8. Parte inferior culata.....	23
Figura 7. Bujía iridio.	23
Figura 9. Sección culata.	24
Figura 10. Colector de admisión.	24
Figura 11. Árboles de levas.	25
Figura 12. Partes de un bloque motor.....	25
Figura 13. Pistón con los segmentos montados.....	26
Figura 14. Cigüeñal con bielas y pistones.....	26
Figura 15. Colector de escape montado en motor.	27
Figura 16. Elementos sistema de embrague.....	27
Figura 17. Motor con válvulas laterales.....	29
Figura 18. Motor con sistema IOE.....	29
Figura 19. Esquema motor con camisa corredera.....	30
Figura 20. Motor con válvulas en culata y árbol de levas en el bloque.....	31
Figura 21. Motor con árbol de levas y válvulas en la culata.	32
Figura 22. Sistema desmodrómico.....	32
Figura 23. Distribución variable.....	33
Figura 24. Motor Crossley.....	34
Figura 25. Patente Frayer y Howard.	34
Figura 26. Patente Vallillee.	35
Figura 27. Motor con válvula giratoria del fabricante Itala.	35
Figura 28. Sistem Castiglione- Bolton.	36
Figura 29. Modelo de válvula rotativa Henriod.	36
Figura 30. Motor con válvula giratoria Reynolds.	37
Figura 31. Motor con válvula giratoria Mead.	37
Figura 32. Válvula cónica The silent valve company.....	38
Figura 33. Motor Speedwell six con válvulas giratorias.....	38
Figura 34. Speedwell con motor de válvula giratoria.....	38
Figura 35. Válvula giratoria con mecanismo de cruz de malta.	39
Figura 36. Esquema sistema Minerva.	39
Figura 37. Sistema Cross de válvula giratoria.	40
Figura 38. Sistema Aspin.....	40
Figura 39. Sección del sistema de válvula rotativa de Froede.....	41
Figura 40. Motocicleta NSU de competición.	41
Figura 41. Motor en V con sistema de válvulas rotativas Wankel.....	42
Figura 42. Sistema Mellors con mecanismo de cruz de malta.....	42
Figura 43. Motor ESSO-Cross.	43
Figura 44. Motor 2 tiempos con admisión por válvula rotativa.....	43
Figura 45. Motor con sistema CSRV.....	44

Figura 46. Yamaha SR 250 Special.	46
Figura 47. Simulación tensiones culatín.	80
Figura 48. Simulación deformación culatín.	80
Figura 49. Simulación tensiones válvula admisión.	82
Figura 50. Simulación deformación válvula de admisión.	82
Figura 51. Simulación tensiones válvula de escape.	83
Figura 52. Simulación tensiones válvula de escape.	84
Figura 53. Simulación de tensiones en piñón superior.	86
Figura 54. Simulación de deformación en piñón superior.	86
Figura 55. Simulación de tensiones sobre engranaje helicoidal.	88
Figura 56. Simulación de deformaciones sobre engranaje helicoidal.	88
Figura 57. Reparto tensiones del eje.	89
Figura 58. Deformaciones eje.	89
Figura 59. Simulación de tensiones de engranaje helicoidal.	90
Figura 60. Gráfica de deformaciones del engranaje.	91
Figura 61. Simulación de reparto de tensiones.	92
Figura 62. Representación deformaciones.	92
Figura 63. Simulación de reparto de tensiones.	93
Figura 64. Deformaciones del eje.	93
Figura 65. Estudio de tensiones en válvula de admisión.	94
Figura 66. Simulación de deformaciones de la válvula.	95
Figura 67. Culatín vista superior.	96
Figura 68. Culatín vista inferior.	96
Figura 69. Culata vista superior.	98
Figura 70. Culata vista inferior.	98
Figura 71. Válvula de disco de escape vista superior.	100
Figura 72. Válvula de disco de escape vista inferior.	100
Figura 73. Válvula de disco de admisión vista superior.	101
Figura 74. Válvula de disco de admisión vista inferior.	102
Figura 75. Engranaje helicoidal válvula de disco de escape.	103
Figura 76. Engranaje helicoidal + Eje.	104
Figura 77. Piñón superior.	106
Figura 78. Tipos de rodamientos.	108
Figura 79. Junta culatín-cilindro.	109
Figura 80. Junta culatín-culata.	111
Figura 81. Junta tapa culata.	113
Figura 82. Tornillos culata-cilindro.	114
Figura 83. Tapa culata vista superior.	115
Figura 84. Tapa culata vista inferior.	116
Figura 85. Pistón vista superior.	117
Figura 86. Pistón vista inferior.	117
Figura 87. Cigüeñal y biela ensamblados.	121
Figura 88. Bulón pistón-biela.	122
Figura 89. Piñón cigüeñal y cadena de distribución.	122
Figura 90. Cilindro vista superior.	123
Figura 91. Cilindro vista lateral.	123
Figura 92. Pistón original con los tres segmentos.	124
Figura 93. Interior del cárter lado del embrague.	124

Figura 94. Caja de cambios.	124
Figura 95. Plato magnético montado en el motor.....	125
Figura 96. Elementos internos nuevo sistema.....	125
Figura 97. Modelo 3D del nuevo sistema sin culata.	126
Figura 98. Modelo 3D del nuevo sistema con culata.....	126
Figura 99. Culata en proceso de impresión.....	149
Figura 100. Culata acabada.....	150
Figura 101. Elementos del nuevo sistema impresos en 3D.....	150
Figura 102. Motor con cilindro y culata desmontados.	151
Figura 103. Motor abierto por el lado del embrague.....	151
Figura 104. Cásteres imprimados (a la izquierda), cásteres pintados (a la derecha)..	151
Figura 105. Piezas originales ensambladas.	152
Figura 106. Motor con el nuevo sistema, sin tapa superior.	152
Figura 107. Motor digital (izquierda) y motor real (derecha) sin culata.	153
Figura 108. Motor con culata.	153

INDICE TABLAS

Tabla 1. Características motor Yamaha SR 250.	46
Tabla 2. Elementos de transmisión.	52
Tabla 3. Posibles materiales del Culatín (1/2).	54
Tabla 4. Posibles materiales del Culatín (2/2).	55
Tabla 5. Posibles materiales del aro de fuego.	57
Tabla 6. Posibles materiales del núcleo.	57
Tabla 7. Posibles materiales del recubrimiento núcleo.	58
Tabla 8. Posibles materiales de la Culata.	60
Tabla 9. Posibles materiales del núcleo.	61
Tabla 10. Posibles materiales del recubrimiento del núcleo.	62
Tabla 11. Posibles materiales de los Tornillos culata-cilindro.	63
Tabla 12. Posibles materiales de la válvula de disco de escape.	65
Tabla 13. Posibles materiales de la válvula de disco de admisión.	67
Tabla 14. Posibles materiales del engranaje válvula de escape.	69
Tabla 15. Posibles materiales del engranaje helicoidal.	70
Tabla 16. Posibles materiales del piñón superior.	72
Tabla 17. Posibles materiales de los rodamientos.	73
Tabla 18. Posibles materiales de la tapa culata.	74
Tabla 19. Posibles materiales de la junta tapa de culata.	75
Tabla 20. Resumen selección de materiales.	77
Tabla 21. Datos simulación del culatín.	79
Tabla 22. Datos simulación de la válvula de admisión.	81
Tabla 23. Datos simulación de la válvula de escape.	83
Tabla 24. Calculo fuerzas de los engranajes.	85
Tabla 25. Datos simulación del piñón superior.	85
Tabla 26. Datos simulación del engranaje helicoidal + eje.	87
Tabla 27. Datos simulación del engranaje helicoidal válvula de escape.	90
Tabla 28. Datos simulación de la válvula de escape.	91
Tabla 29. Datos simulación de la válvula de admisión.	94
Tabla 30. Resumen datos de las simulaciones.	95
Tabla 31. Características del culatín.	97
Tabla 32. Posibles procesos de fabricación del culatín.	97
Tabla 33. Características de la culata.	98
Tabla 34. Posibles procesos de fabricación para la culata.	99
Tabla 35. Características de la válvula de disco de escape.	100
Tabla 36. Posibles procesos de fabricación para la válvula de disco de escape.	101
Tabla 37. Características de la válvula de disco de admisión.	102
Tabla 38. Posibles procesos de fabricación para la válvula de disco de admisión. ...	102
Tabla 39. Características del engranaje helicoidal válvula de disco de escape.	103
Tabla 40. Posibles procesos de fabricación para el engranaje helicoidal (1/2).	103
Tabla 41. Posibles procesos de fabricación para el engranaje helicoidal (2/2).	104
Tabla 42. Características del engranaje helicoidal + Eje.	105
Tabla 43. Posibles procesos de fabricación para el engranaje helicoidal + Eje.	105
Tabla 44. Características del piñón superior.	106
Tabla 45. Posibles procesos de fabricación para el piñón superior.	107

Tabla 46. Características de los rodamientos.	108
Tabla 47. Posibles modelos de rodamientos.....	108
Tabla 48. Características de las partes de la junta de culatín-cilindro.	109
Tabla 49. Posibles procesos de fabricación del aro de fuego.....	110
Tabla 50. Posibles procesos de fabricación del núcleo.	110
Tabla 51. Posibles procesos de fabricación del recubrimiento del núcleo.....	111
Tabla 52. Características de las partes de la junta de culatín-culata.....	112
Tabla 53. Posibles procesos de fabricación del núcleo.....	112
Tabla 54. Posibles procesos de fabricación del recubrimiento núcleo.....	113
Tabla 55. Características de la junta tapa culata.....	114
Tabla 56. Posibles procesos de fabricación de la junta de la culata.....	114
Tabla 57. Características de los tornillos culata-cilindro.....	115
Tabla 58. Procesos de fabricación de los tornillos culata-cilindro.....	115
Tabla 59. Características de la tapa culata.	116
Tabla 60. Posibles procesos de fabricación de la tapa de la culata.....	116
Tabla 61. Características del pistón.	117
Tabla 62. Posibles procesos de fabricación del pistón.....	118
Tabla 63. Resumen de los procesos de fabricación.....	119
Tabla 64. Comparación peso (1/2).....	127
Tabla 65. Comparación peso (2/2).....	128
Tabla 66. Comparación tamaño (1/2).....	128
Tabla 67. Comparación tamaño (2/2).....	129
Tabla 68. Presupuesto (1/2).....	147
Tabla 69. Presupuesto (2/2).....	148

Simbología

Materiales:

SIGLAS	MATERIAL	SIGLAS	MATERIAL
Cu	Cobre	PEK	Poliéter cetona
ETFE	Etileno-Tetrafluoretileno	PEEK	Polieteretercetona
LCP	Polímero de cristal líquido	PEKK	Polietercetonaacetona
Ni	Níquel	PFA	perfluoroalcóxido
PA	Poliamida	PPA	Ácido poliacrílico
PC	Policarbonato	PPS	Polisulfuro de fenileno
PCT	Policiclohexilendimetileno tereftalato	PTFE	Politetrafluoroetileno
PCTFE	Policlorotrifluoroetileno	PVDF	polifluoruro de vinilideno
PEBA	Poliéter bloque amida		

1. Objetivos

En este proyecto se detalla el diseño mecánico y fabricación de una culata, con un nuevo sistema de distribución, en el cual la principal diferencia, respecto a los modelos convencionales, es que las válvulas son discos y tienen un movimiento rotatorio sobre el centro del círculo, en los modelos convencionales tienen forma de seta y tienen un movimiento alternativo.

El proyecto se ha realizado sobre la base de un motor de una Yamaha SR 250cc. y el diseño se ha centrado en la parte del mecanismo y en la selección del material y proceso de fabricación de los nuevos elementos del motor.

Para la realización de este diseño, se ha analizado la evolución de los sistemas de distribución desde los comienzos, así como algunas patentes y modelos que se están evolucionando en la actualidad.

Para la fabricación de este sistema se ha cogido la base de un motor ya existente y se ha rediseñado la parte superior de este. La culata se ha diseñado desde cero, todos los elementos son nuevos. Y debido al nuevo diseño, también se ha modificado el pistón, el cual mantiene su forma original con la diferencia de que en la cabeza del pistón ahora se aloja la cámara de combustión.

Los objetivos principales de este proyecto son:

- Que en caso de rotura de la correa o cadena de distribución, las válvulas no puedan golpear contra el pistón, de forma que se producen daños. De esta forma en caso de que esto se produjera, la reparación consistiría en la sustitución del elemento de transmisión y no de piezas más costosas.

- Al eliminar elementos con movimiento alternativo, y eliminar los muelles, se eliminan esfuerzos que el motor debía afrontar, por lo que por consecuencia se reducen las pérdidas mecánicas del motor, lo que se traduce en un aumento de potencia y reducción del consumo. Además al eliminar estos elementos, también se reducen los ruidos y vibraciones producidas por los golpes de estos elementos.

- Al ser imposible el contacto entre las válvulas y el pistón, es posible el aumento de compresión, con sus correspondientes ventajas, y a su vez se puede mantener o aumentar el cruce de válvulas, también con sus ventajas derivadas.

A consecuencia de las modificaciones, se han obtenido otros beneficios, tales como:

- Al no haber elementos por en medio del flujo de gases, con las válvulas de seta el vástago se encuentra en el centro del flujo de entrada o salida de gases, con las válvulas de disco se evita esto y se incrementa el rendimiento volumétrico del motor, consiguiendo un mejor y más eficaz llenado del cilindro.

- Con el nuevo sistema, al ser todos los movimientos rotacionales se eliminan los problemas de inercia existentes, con los elementos de movimiento alternativo, a un elevado número de revoluciones, los cuales provocaban ruidos, rotura de muelles y quemado de los asientos.

- El nuevo sistema requiere de una altura inferior de la culata, por lo que se reduce la altura total del motor, haciéndolo un poco más compacto.

- Al estar controlada la apertura y el cierre de las válvulas, se elimina el problema de flotado de las válvulas, que se producía por el retardo del muelle a altas revoluciones.

En esta memoria se ha diseñado la nueva culata para que el motor conserve unas prestaciones similares a las originales, dado que no se va a modificar todo el motor y de no ser así se podrían ocasionar roturas, pero se conseguirán mejoras como un funcionamiento más suave, se reducirá el tamaño del motor, y se conseguirá el objetivo principal, que en caso de rotura de la cadena de distribución no se producirían grandes daños.

2. Justificación

Este proyecto de diseño de un nuevo sistema de distribución viene inspirado por el hecho de al haber trabajado como mecánico, se ha observado y solucionado diversos problemas y averías en diversidad de vehículos, esto hizo surgir la idea de este proyecto, dado que el problema de rotura de la correa o cadena de distribución es un problema que se repite más de lo que debería, ya sea por un mal mantenimiento del vehículo, por agentes externos que interfieren con el motor, o por un mal uso del vehículo.

La elección de un motor de Yamaha SR 250cc se debe a la necesidad de un motor de cilindrada no muy pequeña, para no dificultar la fabricación de las nuevas piezas. La necesidad de que dispusiera, originalmente, de un sistema de distribución con árbol de levas en la culata, y por último y no menos importante, era el modelo que podía conseguir con mayor facilidad y sin necesidad de una gran inversión. Además lo bueno de este motor es que es fácil encontrar documentación y vehículos en funcionamiento con el que compararlo en caso de construir uno operativo.

Lo que también influyó en la elección de este proyecto fueron los estudios realizados así como la trayectoria profesional que he desempeñado, siempre ligada a la automoción. En cuanto a los estudios, que a esto respectan, se ha cursado un ciclo formativo de Grado Medio de electromecánica de vehículos, seguidamente el Grado Superior en automoción y por último, de momento, la Ingeniería Mecánica en mención de vehículos. En cuanto a la trayectoria profesional siempre se ha trabajado en talleres tanto de mecánica como de chapa y pintura.

3. Introducción

Este proyecto se ha estructurado en diversos apartados siguiendo el orden que se ha considerado más adecuado para mejor exposición y comprensión de éste. Se ha empezado por exponer los objetivos de este proyecto. Seguidamente se ha procedido a justificar el motivo por el cual se decidió a realizarlo. Antes de empezar a especificar de qué se trata el proyecto se ha añadido un apartado donde se definen algunos términos importantes y también se expone una revisión cronológica por los sistemas de distribución utilizados en motores de combustión y más concretamente se hace una revisión cronológica por los sistemas de distribución con válvulas rotativas.

La parte principal del proyecto está formado por la descripción del nuevo sistema de distribución por válvulas rotativas, la selección de materiales y proceso de fabricación de los nuevos elementos y las condiciones de diseño que han influido. También hay un apartado importante que incluye el modelado en 3D del nuevo sistema de distribución por válvulas rotativas y la fabricación de una maqueta impresa con una impresora 3D.

Como apartados finales se ha realizado un pliego de condiciones donde plasmar las condiciones correctas para la fabricación de este nuevo sistema de distribución. También se ha realizado un presupuesto orientativo sobre el coste que tendría fabricar un motor con este sistema de distribución por válvulas rotativas. Y como punto final se exponen las conclusiones sobre todo el proyecto.

En la siguiente grafica que expone la temporalización del proyecto nombrando las etapas más relevantes del proyecto. El tiempo total, de 320 horas, está dividido en 10 parte de forma que se pueda observar fácilmente el peso de cada etapa en el proyecto. Es difícil adjudicar un tiempo específico a cada apartado, dado que es un proyecto en el cual los apartados se complementan y se intercalan, pero la grafica es una aproximación del peso de cada etapa y el orden en el cual se han realizado.

Planteamiento del proyecto: En primer lugar para poder empezar a realizar el proyecto se tuvo que plantear la idea inicial y establecer el enfoque que se quería dar al proyecto y hasta donde que deseaba abarcar.

Diseño del sistema: Una vez realizado el planteamiento se procedido al diseño del nuevo sistema de distribución con válvulas rotativas, que consta del diseño del sistema inicial, de realizarle modificaciones según los inconvenientes encontrados o las características necesarias no planteadas inicialmente, además de la selección de materiales y de los procesos de fabricación de cada elemento.

Búsqueda de información: Búsqueda de datos, otros sistemas, ideas que aplicar, etc.

Resolución de problemas: Evaluación, búsqueda de soluciones y selección de la mejor opción para los problemas e inconvenientes encontrados.

Cálculos: Realización de cálculos para establecer algunos términos y condiciones de funcionamiento del nuevo sistema de distribución con válvulas de disco.

Modelado 3D y simulación: Realización de un modelo 3D con un programa informático, Solid Works, y simulación sobre el modelo informático.

Memoria: Redacción, organización y revisión de la memoria de todo el proceso seguido por el proyecto.

Montaje impresora 3D: Para la fabricación de la maqueta se opto por realizarlo con una impresora 3D por lo que se compro una impresora en kit, la cual viene las piezas y hay que realizar el montaje, tanto de la parte mecánica como de la eléctrica. La impresora es una BQ Prusa i3 con algunas modificaciones para su mejor funcionamiento.

Impresión y ensamblaje maqueta: Impresión de cada elemento nuevo de la maqueta y ensamblaje y ajuste de todas las piezas.

ETAPAS	Tiempo (32 horas cada bloque)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Planteamiento del proyecto	■									
Diseño del sistema		■	■							
Búsqueda de información		■	■	■	■					
Resolución de problemas	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cálculos					■					
Modelado 3D y simulación		■	■							
Memoria				■	■	■	■	■	■	■
Montaje impresora 3D							■	■		
Impresión y ensamblaje maqueta								■	■	■

Gráfica 1. Temporalización.

3.1. Definiciones

En este punto se describen elementos que forman parte de un motor de combustión, de forma que entremos en materia.

-Partes de un motor gasolina:

Motor combustión interna: Es una máquina que transforma energía química, de un combustible, en energía mecánica. El combustible arde dentro de la cámara de combustión.



Figura 1. Motor de moto 4 tiempos Otto

Motor de ciclo Otto: son motores de combustión interna de encendido provocado y cuyo combustible suele ser la gasolina.

Motor diesel: son motores cuya combustión se produce por autoencendido de la mezcla, debido a las altas temperaturas y presiones que hay en la cámara de combustión.

Motor Wankel: es un tipo de motor de combustión interna, inventado por Félix Wankel, que utiliza rotores en vez de los pistones de los motores alternativos.

Distribución: Se trata de un conjunto de piezas que, accionadas por el motor, abren y cierran las válvulas de admisión y escape, a través del movimiento del árbol de levas, que esta sincronizado con el cigüeñal por medio de un mecanismo de correa o cadena.

Motor 4 tiempos: Se denomina así a los motores de combustión interna alternativos, que precisan de cuatro carreras del pistón para completar el ciclo termodinámico de combustión, este ciclo se puede observar en la figura 2 extraída de <http://www.toyocosta.com/blog/motor-de-cuatro-tiempos/>. Estos cuatro tiempos son:

Admisión: en esta carrera descendente del pistón, se aspira la mezcla debido al desplazamiento del pistón. La válvula de escape permanece cerrada, mientras que la de admisión está abierta.

Compresión: en esta carrera ascendente del pistón, se comprime la mezcla. Las válvula de admisión y escape están cerradas.

Explosión/expansión: cuando el pistón llega al punto más alto de su carrera. En los motores de ciclo Otto salta la chispa en la bujía, provocando la inflamación de la mezcla, mientras que en los motores diesel, se inyecta el combustible muy pulverizado, que se auto inflama por la presión y temperatura existentes en el interior del cilindro.

Una vez iniciada la combustión, la temperatura y la presión en el interior del cilindro aumenta rápidamente, expandiendo los gases que empujan el pistón en su carrera descendente. Esta es la única fase en la que se obtiene trabajo. Las dos válvulas se encuentran cerradas.

Escape: en esta carrera ascendente, los gases de la combustión que salen a través de la válvula de escape que permanece abierta. Al llegar al punto más alto del cilindro, se cierra la válvula de escape y se abre la de admisión, reiniciándose el ciclo.

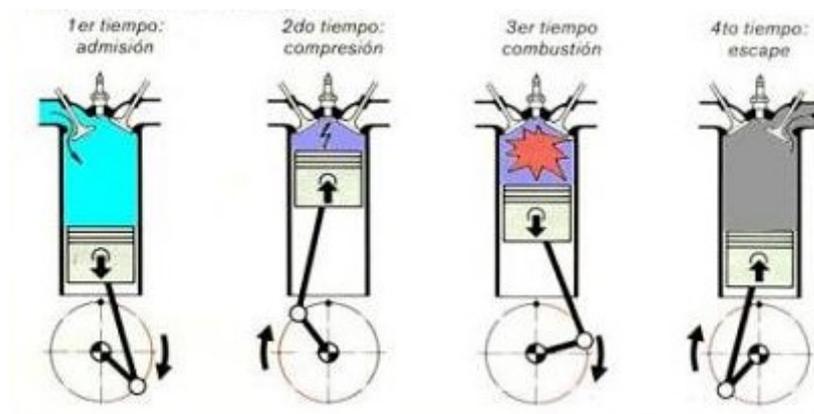


Figura 2. Ciclo 4 tiempos Otto.

Motor 2 tiempos: Es un motor de combustión interna que realiza las cuatro etapas del ciclo termodinámico (admisión, compresión, explosión y escape) en dos movimientos lineales del pistón (una vuelta del cigüeñal). En la figura 3, obtenida de la página web http://e-ducativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4932/html/5_motor_de_dos_tiempos.html, se representa el ciclo que realiza un motor de 2 tiempos:

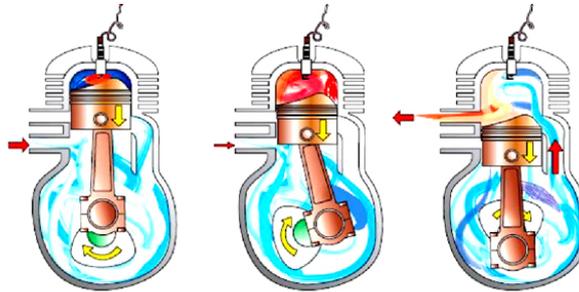


Figura 3. Ciclo 2 tiempos Otto.

Filtro de aire: Su función es atrapar el polvo y otras partículas para que el aire que entre al motor, sea lo más limpio posible, pero debe hacer esta función sin restringir en exceso el flujo de aire.

Mezcla: Es la combinación de aire y combustible que se introduce en el motor, la cual explota al saltar la chispa de la bujía. La proporción cambia según si se desea subir de revoluciones o bajar, y según la potencia que se quiera conseguir.

Carburador: Tiene la función de mezclar el combustible con el aire antes de su entrada en el motor. Esta mezcla se efectúa en el interior de un tubo con un estrechamiento practicado al efecto, donde se pulveriza la gasolina por efecto venturi.

La cantidad de mezcla se regula por medio de un mecanismo llamado mariposa. Por medio del acelerador se regula el mecanismo de la mariposa, lo que permite una mayor o menor entrada de aire al carburador. De esa forma se enriquece o empobrece la mezcla que entra en la cámara de combustión. Cuando la mezcla es pobre, las revoluciones disminuyen y cuando es rica, aumentan.



Figura 4. Carburador con filtro de aire cónico.

Los motores más modernos y actuales no utilizan ya carburador, emplean un sistema de inyección de gasolina. Este sistema se controla de forma electrónica lográndose así un mayor aprovechamiento y optimización en el consumo del combustible.

Venturi: Es un fenómeno en el que un fluido en movimiento dentro de un conducto cerrado disminuye su presión cuando aumenta la velocidad al pasar por una zona de sección menor, si en este punto se introduce el extremo de otro conducto, se produce una aspiración que se mezclará los dos fluidos. En el caso del carburador el aire es el fluido que se acelera y la gasolina la que es aspirada.

Mariposa (acelerador): Es un mecanismo usado en los motores de ciclo Otto con el cual se regula el flujo de la mezcla en el caso de motores de carburador o del aire en los motores de inyección de combustible, abriendo y cerrando el paso de un conducto. En la figura 5 se puede ver las 4 mariposas de un motor de una motocicleta, foto de https://www.kawasaki-cp.khi.co.jp/technology/engine/tech_dualthrottlevalves_e.html.



Figura 5. Mariposas motor de 4 cilindros.

Bobina de encendido o ignición: Es un dispositivo eléctrico destinado a producir una carga de alto voltaje, la figura 6 representa el interior de una bobina de encendido, la fuente de la imagen es <http://tallerautoelectrico.com/sistema-de-encendido-conventional/>. La bobina es un transformador eléctrico, que eleva por inducción electromagnética la tensión entre los dos enrollados que contiene en su interior. El enrollado primario se conecta a la batería de 12 volt, mientras que en el enrollado secundario se produce una tensión de 15 mil ó 20 mil volt. Esa corriente se envía al distribuidor que se encarga de distribuirla a las bujías.

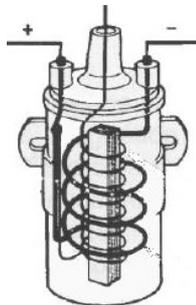


Figura 6. Bobina encendido.

Filtro de aceite: Se encarga de atrapar toda sustancia que pueda contener el aceite del motor.

Bomba de aceite: Se encarga de dar presión al circuito de aceite de forma que el aceite pueda llegar a todos los elementos del motor que necesitan de lubricación, asegurando que todos reciban la lubricación adecuada para que se puedan mover con suavidad.

Cárter: Es la parte más baja del motor, donde se deposita el aceite que utiliza el motor. Una vez que la bomba de aceite distribuye el lubricante, el sobrante regresa al cárter por gravedad, permitiendo así que el ciclo de lubricación continúe.

En las motocicletas, en el cárter se encuentra también la caja de cambios y el embrague.

Aceite lubricante: La función principal es la de lubricar todas las partes móviles del motor, con el fin de disminuir el rozamiento y la fricción entre ellas, de forma que se reduce el desgaste de éstas.

Otras funciones que realiza, son las de refrigerar las partes más calientes del motor, arrastrar la posible suciedad hasta el filtro de aceite para mantener limpio el motor, y por ultimo suavizar los ruidos y vibraciones del motor.

El aceite en teoría no se consume, pero cuando los motores empiezan a desgastarse se produce paso de aceite a la cámara de combustión y si se consume, o hay pérdidas al exterior por lo que se reduce el nivel de aceite. Además de por estas cosas, el aceite va acumulando suciedad del motor y sus aditivos pierden sus propiedades, por lo que la acción lubricante del aceite se reduce, por este motivo el aceite se debe sustituir periódicamente.

Cables de alta tensión de las bujías: Son cables que conducen la alta tensión desde el distribuidor hasta las bujías.

Bujía: La función de la bujía es hacer saltar en el electrodo una chispa eléctrica dentro de la cámara de combustión del cilindro cuando recibe la carga de alta tensión procedente de la bobina de ignición y del distribuidor. En el momento justo, la chispa provoca la explosión de la mezcla. Cada motor requiere una bujía por cada cilindro que contenga su bloque.



Figura 7. Bujía iridio.

Para realizar esta función la bujía tiene un conector, en su parte superior, en el que se conecta el cable de alta tensión. Y en el otro extremo tiene un electrodo que es donde se produce el salto de la chispa. Para cerrar el circuito la bujía se enrosca a la culata y hace de masa para el circuito. Para separar las dos partes de la bujía se coloca un recubrimiento cerámico.

Culata: Es la parte del motor que cierra los cilindros por su lado superior y donde suelen ir colocadas las válvulas. La forma y las características siempre han ido estrechamente ligadas a la evolución de los motores y, principalmente, han sido condicionadas por el tipo de distribución y la cámara de combustión. En la figura 8 se observa la parte inferior de una culata de un motor de 4 cilindros con árbol de levas en la culata, obtenida de www.asysum.com (<http://www.asysum.com/portfolio-item/culata/>). En la figura 9 se representa una sección de la culata en la que se ve el mecanismo de accionamiento de las válvulas, por medio de un árbol de levas y balancines, la fuente de la imagen es <https://cuidamostucoche.com/wiki/Empujadores+y+balancines>.



Figura 8. Parte inferior culata.

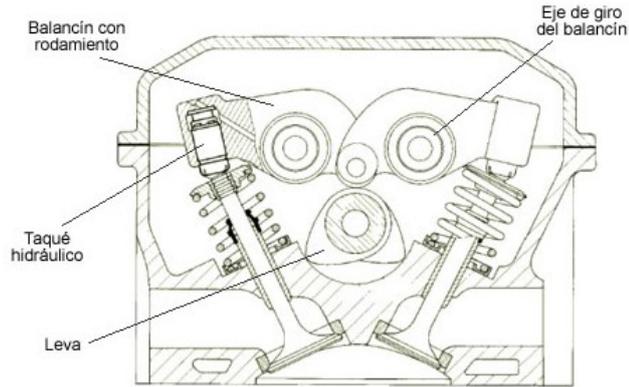


Figura 9. Sección culata.

Balancín: En los motores del tipo OHV (Over Head Valves – Válvulas en la culata), el balancín es un mecanismo que bascula sobre un punto fijo, que se halla situado en culata. Su función es empujar hacia abajo las válvulas de admisión y escape para que se abran. El balancín, a su vez, es accionado por una varilla de empuje movida por el árbol de levas o directamente por el árbol de levas.

Muelle de válvula: El muelle tiene la función de mantener cerrada la válvula o cerrarla una vez deja de hacer fuerza sobre ella el balancín. En cada válvula se monta un muelle o varios, según constitución del motor.

Válvula de escape: Pieza metálica en forma de seta, cuya misión es la de permitir la salida de los gases de escape una vez se ha producido la combustión.

Los motores pueden tener solo una válvula de escape por cilindro o varias, según las características del motor.

Válvula de admisión: Pieza similar a la válvula de escape, cuya función es la de permitir la entrada de la mezcla en el tiempo de admisión.

Colector de admisión: Conducto por el que llega a la cámara de combustión la mezcla procedente del carburador para dar inicio al tiempo de admisión. En algunos motores de inyección se produce la mezcla en el colector. En los motores actuales por el colector llega solo aire y la mezcla se produce en el interior de la cámara de combustión. En la figura 10 se observa un colector de admisión con inyección en el colector, imagen extraída de <https://motorgiga.com/notas-prensa/colector-de-escape-y-colector-de-admision-que-diferencia-existe-entre-estos-dos-elementos/gmx-niv185-con384420.htm>.



Figura 10. Colector de admisión.

Cámara de combustión: Espacio dentro del cilindro entre la culata y la parte superior o cabeza del pistón, donde se efectúa la combustión de la mezcla que llega del carburador.

Varilla empujadora: Varilla metálica encargada de mover los balancines en un motor con válvulas en la culata y árbol de levas en el bloque.

Árbol de levas: Eje, compuesto por tantas levas como válvulas de admisión y escape tenga el motor. Se encarga de infringir movimiento, ya sea a través de balancines, varillas que empujen a los balancines o directamente a las válvulas. En algunos motores se montan dos árboles de levas, uno para válvulas de admisión y otro para las válvulas de escape. En la figura 11 se ven dos árboles de levas, imagen obtenida de <https://www.levascresco.com/arboles-de-levas/>.



Figura 11. Árboles de levas.

El árbol de levas se encuentra sincronizado con el cigüeñal, efectúa medio giro por cada giro completo de éste. Según el tipo de motor, el árbol de levas se encuentra montado en el bloque motor o en la culata. Además hay motores que cuentan con dos árboles de levas, uno para las válvulas de admisión y otro para las de escape.

Bloque motor: Es el cuerpo principal del motor y se encuentra instalado entre la culata y el cárter. El bloque es una pieza que suele estar fabricada de hierro fundido, aluminio o aleaciones especiales, provisto de grandes agujeros llamados cilindros. En la parte superior se monta la culata, formando un cuerpo con los cilindros. El bloque del motor debe ser rígido para soportar las fuerzas de la combustión, ser resistente a la corrosión y permitir evacuar por conducción parte del calor. En la figura 12 se indican algunas partes del bloque motor, imagen extraída de <http://www.aficionadosalamecanica.net/motor-estructura.htm>.

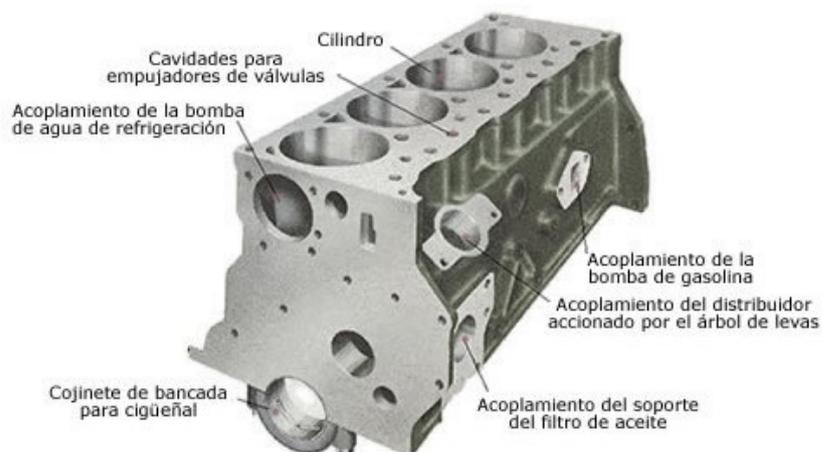


Figura 12. Partes de un bloque motor.

Segmentos del pistón: Son aros de acero que se alojan en ranuras que posee el pistón. Existen de dos tipos: de compresión o fuego y rascador de aceite:

- De compresión o fuego: sella la cámara de combustión para que durante la compresión la mezcla no pase al cárter; también impide que los gases de escape pasen al cárter durante la explosión.

- Rascador de aceite: se encarga de que una pequeña cantidad de lubricante pase hacia la parte superior del cilindro y arrastra el sobrante devolviéndolo al cárter por gravedad. Este segmento posee pequeñas aberturas para facilitar la distribución del lubricante en la superficie del cilindro.

Los pistones suelen llevar tres segmentos. Los dos superiores son de compresión o fuego, y el más bajo es un rascador de aceite. Como se observa en la figura 13, obtenida de <http://laspalmastecnologica.blogspot.com/2015/02/motores-tema-33-componentes-motortren.html>.



Figura 13. Pistón con los segmentos montados.

Pistón: Tiene forma de cubo invertido vacío en el interior. En la parte externa tiene mecanizado tres ranuras donde se alojan los segmentos. Bajo la zona de los segmentos tiene dos agujeros enfrentados, que sirven para fijar el bulón que une el pistón con la biela.

Biela: Es una pieza con forma alargada que une el pistón con el cigüeñal de forma que convierte el movimiento lineal y alternativo del pistón en giratorio. En cada extremo tiene un punto de unión articulado, por un lado con el pistón y por otro con el cigüeñal.

Bulón: Es una pieza con forma de cilindro que articula la biela con el pistón.

Cigüeñal: Este elemento consiste en un eje con tantas manivelas como cilindros tenga el motor, donde se montan las bielas de los cilindros. Posee unos apoyos, con centro el eje, que se montan sobre el cárter del motor. De esta forma al recibir el movimiento alternativo de los pistones, este mecanismo lo transforma en movimiento giratorio. En la figura 14 se observa un cigüeñal con las bielas y pistones montados sobre él, esto ha sido extraído de <https://revistamotor.eu/index.php/de-calle/mecanica/737-el-cigüeñal-sin-bielas-de-manuel-costas-realidad-o-ficcion>.



Figura 14. Cigüeñal con bielas y pistones.

Colector de escape: Conjunto de conductos por donde salen del motor los gases de la combustión. Normalmente se le conecta un tubo con un silenciador para amortiguar y dirigir el sonido de las explosiones. En la figura 15 se observa un colector de escape montado sobre un motor de 6 cilindros, la fuente de la imagen es <http://www.testautomovil.com/explicacion-1739.html>.



Figura 15. Colector de escape montado en motor.

Motor de arranque: Es un motor eléctrico cuya función es hacer girar el motor para permitir que este se ponga en funcionamiento. EL motor de arranque tiene un sistema que cuando recibe corriente, además de girar engrana con el volante de inercia del motor, haciéndolo girar. Este elemento recibe la corriente de la batería, controlado por el conductor del vehículo, una vez arranca el motor, se deja de alimentar el motor eléctrico y este se desacopla del motor.

Volante de inercia: Se trata de una masa metálica con forma de disco, que se monta unida al cigüeñal. Su función es acumular la fuerza de inercia de las explosiones, de forma que el motor gire de forma uniforme, cosa que no sucedería sin este elemento dado que por cada explosión el cigüeñal solo gira media vuelta y por lo tanto necesita más inercia para completar vuelta y media más hasta la siguiente explosión.

Embrague: Mecanismo que permite controlar la transmisión de movimiento entre el motor y la caja de cambios. Está formado por varios elementos, uno fijos al motor y otros a la caja de cambios y un sistema de desacoplamiento para impedir o permitir la transmisión de movimiento. En la figura 16 se observan las partes del mecanismo de embrague, imagen extraída de <http://conducirsinmiedo.blogspot.com/2015/08/tres-cosas-que-nunca-debes-hacer-con-el.html>.



Figura 16. Elementos sistema de embrague.

Caja de cambios: Es un sistema que transforma las revoluciones del motor para adaptarlas a la velocidad que necesitamos en las ruedas. De esta manera podemos circular a diferentes velocidades aunque el motor funcione al mismo régimen. La caja de cambios se intercala entre el motor y la salida de movimiento.

Adelanto-retraso-cruce válvulas: En el ciclo termodinámico teórico de un motor de combustión interna, las válvulas se cierran y abre siempre cuando el pistón está en la parte más alta o más baja de su carrera. Pero esto no es así en el ciclo real. Para sacar el máximo rendimiento de un motor, es necesario que las válvulas se abran antes de que el pistón alcance los extremos de la carrera, de forma que se aprovechan mejor las inercias de los gases para llenar y vaciar de forma más eficaz el cilindro, de gases.

Adelanto de una válvula: es el hecho de que esta se abra antes del punto en que se abriría en el ciclo teórico. Y el retraso de una válvula, se refiere a que esta se cierra un tiempo después del momento en que se cerraría en el ciclo teórico. Estos adelantos y retrasos se miden en grados que gira el cigüeñal antes de realizar la acción.

El cruce de válvulas se refiere al tiempo en que coinciden las válvulas de admisión y escape abiertas, esto es posible, dado que los gases de admisión entran con fuerza en el cilindro y los de escape tienen inercia de salir del cilindro, y por diferencia de temperaturas no se mezclan. Además los gases de admisión empujan a los de escape y favorecen el vaciado del cilindro.

Términos del nuevo sistema:

Cámara válvulas: Se trata del hueco en el que se encuentran las válvulas de disco, esta cámara se formara entre la culata y el culatín. Una de sus funciones es que los gases de la combustión no lleguen al cárter del motor, además el ajuste entre la cámara y las válvulas es primordial para el funcionamiento del motor.

Culatín: En el nuevo sistema la culata esta partida en dos partes, la parte inferior, que es la que está en contacto con la cámara de combustión y que tiene mecanizada la cámara de las válvulas, se denomina culatín. Y la parte superior, donde se anclan los mecanismos de distribución y tiene los colectores de admisión y escape, se sigue llamando culata.

3.2. Cronología de los sistemas de distribución empleados en la industria automotriz

Antes de empezar con la modificación del sistema, haremos una revisión por la historia de los sistemas de distribución en motores de combustión que se han utilizado a lo largo de la historia, la información e imágenes de este apartado se ha obtenido de diversos libros y páginas de internet, en las imágenes se indica cada página web de donde se ha obtenido la foto y el libro consultado para las descripciones es el libro Motores de Santiago Sanz.

-Válvulas laterales o SV (Side Valves):

Este sistema es más sencillo y tiene menos piezas que los sistemas utilizados posteriormente. El árbol de levas se sitúa por debajo del cilindro y acciona las válvulas directamente, el cerrado de las válvulas lo efectúan muelles. Las válvulas se montan en el bloque motor, paralelas al cilindro, por esto la cámara de compresión es mayor que en los

posteriores sistemas y el tamaño de las válvulas está limitado. La figura 17 representa una sección de un motor SV, imagen obtenido de <https://www.pruebaderuta.com/que-es-un-motor-sv-ohv-sohv-y-dohc.php>.

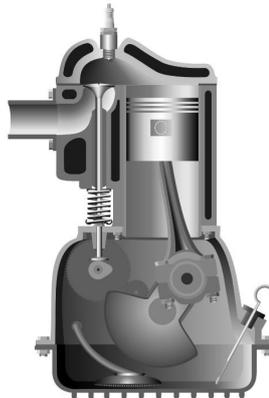


Figura 17. Motor con válvulas laterales.

Presenta las ventajas de que es más sencillo y barato de construir. Pero tiene grandes desventajas: el camino seguido por la mezcla aire/combustible para entrar al cilindro limita el flujo de aire, y limita las revoluciones a un rango entre 2.000-2.500 rpm, además el recorrido de los gases de escape por el interior del bloque provoca sobrecalentamiento cuando el motor trabaja con carga de forma continuada.

-IOE (intake/inlet over exhaust) o Admisión sobre escape:

Este sistema es una evolución del motor SV, en este tipo de motor las válvulas de admisión se montan en la culata y son accionadas por balancines y varillas de empuje, las cuales transmiten el movimiento del árbol de levas. Las válvulas de escape siguen colocadas en el bloque. En la figura 18 se observa la disposición de las válvulas en el motor, imagen extraída de http://www.pinsdaddy.com/f-head-engine_UiSZ0dQtm8iLNEz*3ViJdkTgSnnVeT9kBSU3mXH01cQ/.

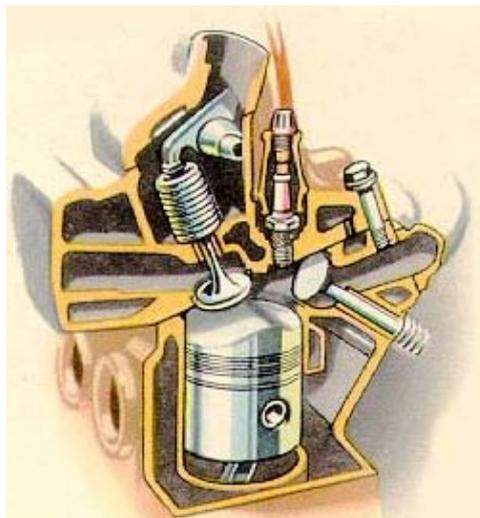


Figura 18. Motor con sistema IOE.

Las ventajas de este sistema respecto del anterior son que la cámara de combustión se puede hacer más pequeña que en el sistema SV, la bujía se puede colocar en una mejor posición para mejorar la propagación de la llama, y además la mezcla entra más fresca y más homogénea. Como inconvenientes la cámara de combustión presenta una forma más

compleja, que afecta a la correcta combustión y puede crear puntos calientes en la cabeza del pistón, la posición de la válvula de escape dificulta el barrido eficiente de los gases de escape. Al tener más elementos, balancines y varillas de empuje, es más complejo y costoso de fabricar que un motor de sidevalve, además que es más grande debido a que los balancines van colocados en la culata, y es necesario espacio para las válvulas de admisión y colectores.

-Válvula de manga, válvula de camisa, o válvula de camisa corredera:

Este sistema está formado por una o más camisas mecanizadas con lumbreras, montadas entre el pistón y el cilindro, estas camisas rotan y/o se deslizan para hacer coincidir sus agujeros con las lumbreras de admisión y escape del cilindro en el momento adecuado. Existen dos sistemas de control del movimiento de las camisas: por medio de bieletas para sistemas de dos camisas y por medio de un eje colocado a 90° del eje del cilindro para los sistemas de una única camisa. En la figura 19 se observa la sección de un motor con sistema de válvula de manga de dos camisas, imagen obtenida de http://www.automovilsport.com/historia/motores_valvulas/nota.html.

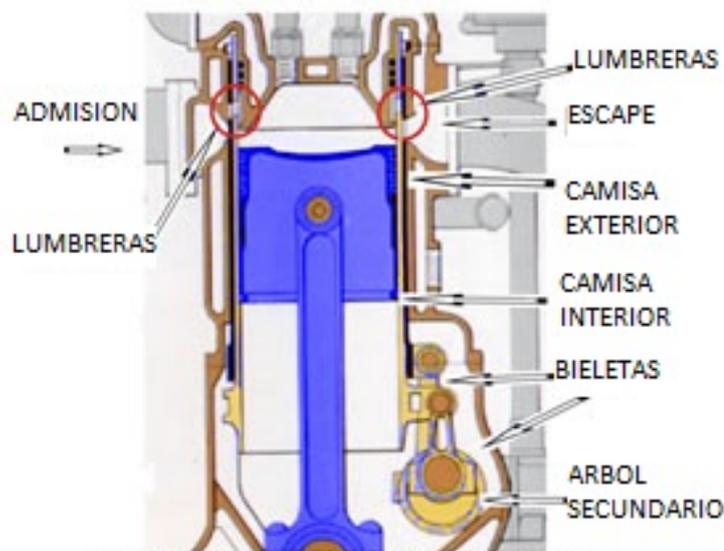


Figura 19. Esquema motor con camisa corredera.

Este sistema presentaba grandes ventajas sobre los motores de válvula de asiento de la época, tales como:

- Gran eficiencia volumétrica debido a la gran apertura de las lumbreras de entrada.
- Buen barrido de los gases de escape y una turbulencia controlada para la mezcla aire/combustible entrante, dado que al abrir la lumbrera de admisión la mezcla entra tangencialmente al cilindro.
- No presentaba muelles, por lo que se eliminan los problemas relacionados con estos y el golpeo de las válvulas.
- La durabilidad de los motores era superior a los de válvulas de asiento, a los que se les debía rectificar los asientos de válvula cada 3000 o 8000 Km.
- Al no tener las válvulas en la culata, la bujía se podía colocar en el lugar idóneo.

En cuanto a las desventajas de este sistema, cabe destacar que es difícil conseguir una estanqueidad perfecta por lo que los consumos de aceite son elevados comparando con los motores modernos, en la época no existía una diferencia importante. Además la incorporación de un sistema con una única camisa, redujo el consumo de aceite. Otro inconveniente es que el pistón tapa parte de las lumbreras en el cruce de lumbreras, lo que reduce el rendimiento.

-Válvulas rotativas

Este tipo de motor, se basa en la utilización de válvulas que por medio de un movimiento giratorio, controlan la entrada y salida de gases del motor de combustión, existen muchas variantes, las cuales serán expuestas en el apartado " Revisión cronológica de sistemas de distribución rotativos".

En el pasado se intentaron utilizar diferentes tipos de motores con válvulas rotativas, pero por distintos motivos dejaron de utilizarse, la mayoría por el excesivo rozamiento entre las piezas al soportar las grandes presiones de la combustión. Los datos históricos exponen que estos motores presentaban, durante su funcionamiento, menos problemas mecánicos que otros tipos de motores, con el único inconveniente que trabajaban con presiones inferiores.

No existen muchos datos de estos motores y algunos no se han encontrado modelos operativos, solamente existen las patentes, por lo que es difícil la comprensión de algunos modelos. Algunos de estos datan desde 1886 hasta 1991.

Actualmente se trabaja en motores con válvulas rotativas en forma de esfera, como se explica en el siguiente apartado.

-OHV (overhead valve) o válvulas en culata:

La principal característica de este sistema es tener el árbol de levas en el bloque motor y las válvulas en la culata, la transmisión de movimiento se realiza por medio de varillas y balancines. La transmisión de movimiento entre el cigüeñal y el árbol de levas, se efectúa por medio de engranajes o por medio de una cadena corta.

En cuanto a las ventajas de este sistema, esta la reducción del tamaño de la cámara de combustión, de forma que permite el aumento de la relación de compresión y por lo tanto mejora el rendimiento. Como inconveniente, el aumento del número de elementos repercute en más fallos y desgastes acumulados del sistema. LA figura 20 muestra un motor con sistema OHV, extraído de <http://www.aficionadosalamecanica.net/motor-distribucion.htm>.

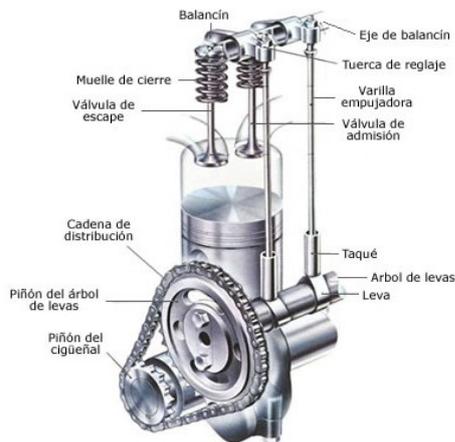


Figura 20. Motor con válvulas en culata y árbol de levas en el bloque.

-OHC (overhead cam) o árbol de levas en culata:

Este sistema monta el árbol de levas y las válvulas en la culata, de este modo se eliminan elementos de transmisión, el árbol de levas actúa directamente sobre las válvulas por medio de unos elementos intermedios, denominados taques. La transmisión de movimiento del cigüeñal al árbol de levas se realiza por medio de una correa dentada o de una cadena. La principal ventaja de este sistema es la reducción de elementos entre el árbol de levas y las válvulas, por lo que la apertura y cierre es más preciso. El problema principal que presenta es que incorpora elementos de transmisión entre el cigüeñal y el árbol de levas, los cuales necesitan de mantenimiento y sustitución con el uso. Existen dos variantes de este sistema: el SOHC (single overhead camshaft) un árbol de levas en culata y DOHC (double overhead camshaft) dos árboles de levas en la culata. En la figura 21 se observa un sistema SOHC, obtenida de <https://www.nitro.pe/mecanico-nitro/que-es-y-como-funciona-una-correa-de-distribucion.html>.

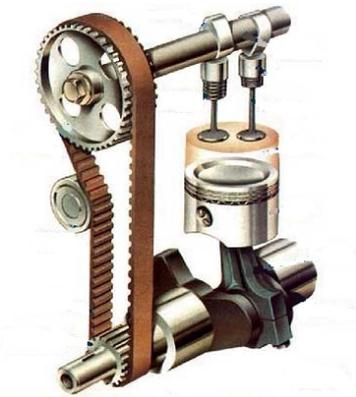


Figura 21. Motor con árbol de levas y válvulas en la culata.

La principal diferencia entre estos dos tipos es el número de árboles de levas. El doble árbol de levas permite una configuración distinta entre las válvulas de admisión y las de escape, dado que cada árbol de levas controla unas válvulas.

-Sistema desmodrómico:

Este sistema presenta la principal característica de que no utiliza muelles para el cerrado de las válvulas, dado que monta un mecanismo que controla tanto la apertura como el cierre de las válvulas, de esta forma se suprimen los muelles y los problemas que estos pueden ocasionar, como el rebote de válvulas. La principal ventaja es la posibilidad de poder funcionar a mayor régimen de vueltas que los motores convencionales y por lo tanto conseguir un incremento en la potencia. Como desventaja presenta la complejidad del sistema y el elevado coste. En la figura 22 se puede apreciar el mecanismo desmodrómico de una motocicleta Ducati,, imagen extraída de <https://www.bluming.com/ducatidesmo.htm>.



Figura 22. Sistema desmodrómico.

-Distribución variable:

La principal característica de este sistema es que, por medio de un mecanismo, puede variar los tiempos de apertura y cierre de las válvulas, esto es beneficioso dado que el momento óptimo de apertura y cierre de las válvulas varía con el régimen de giro del motor. La principal ventaja de este sistema es que permite un rendimiento más óptimo a distintos regímenes y no solo en un pequeño rango. Existen muchas variantes de la distribución variable, cada fabricante utiliza un sistema, pero todos con el mismo objetivo, conseguir un rendimiento óptimo en todos los regímenes de funcionamiento. En la figura 23 se observa un sistema de distribución variable por medio de una cadena y un tensor controlado hidráulicamente, archivo extraído de http://www.aficionadosalamecanica.net/distribucion_variable1.htm

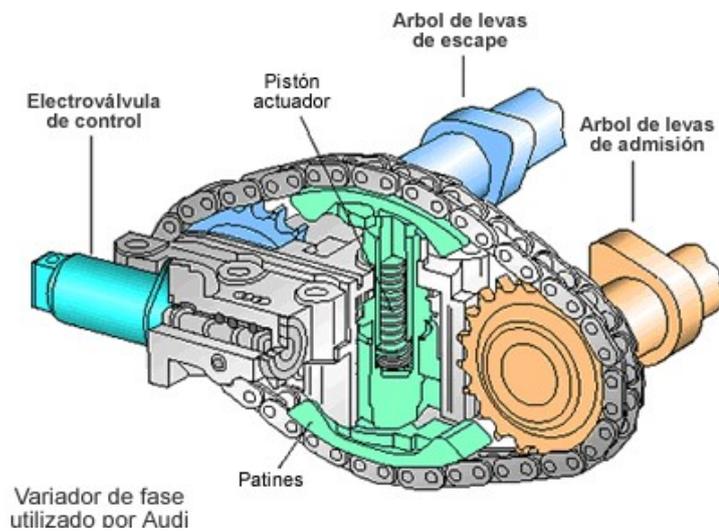


Figura 23. Distribución variable.

3.3. Revisión cronológica de los sistemas de distribución rotativos

En este apartado se hace una revisión a los sistemas de distribución rotativos que se han diseñado, patentados o construidos durante la historia y de los que se tiene constancia hasta la fecha. Esta información e imágenes se han extraído de la página web <http://www.douglas-self.com/MUSEUM/POWER/unusualCeng/RotaryValveIC/RotaryValveIC.htm> dado que es la fuente de información con mayor número de ejemplos que se ha podido encontrar en lo que respecta a este tema, además de ser una página fiable en cuanto a su veracidad, aun así ha sido contrastada con otras fuentes de información. En algunos puntos se cita textualmente lo escrito en esta página, aunque ha sido traducido.

Motor Crossley de gas con válvula rotativa. (1886 - 1902)

Este es el primer uso de una válvula giratoria en un motor de combustión interna hasta ahora descubierto. Estos motores tenían una potencia específica muy baja en comparación con los diseños posteriores, y las presiones de trabajo eran bajas.

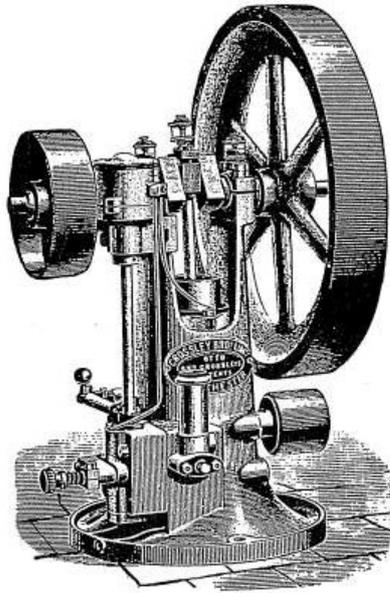


Figura 24. Motor Crossley.

Frayer y Howard patente válvula rotativa. Patente 5 Enero 1909. Nº 908,656

Esta es la patente de válvula rotativa más antigua en un motor combustión interna. La válvula está montada horizontalmente en la culata, y conducido de forma continua por la cadena y la rueda dentada del cigüeñal. La válvula, fue diseñada para que no toque el metal, manteniendo una distancia de 2 milímetros, este hueco se inundara con aceite. La válvula va montada sobre rodamientos de bolas en cada extremo, protegido de los gases de escape por dos conjuntos de anillos de sellado.

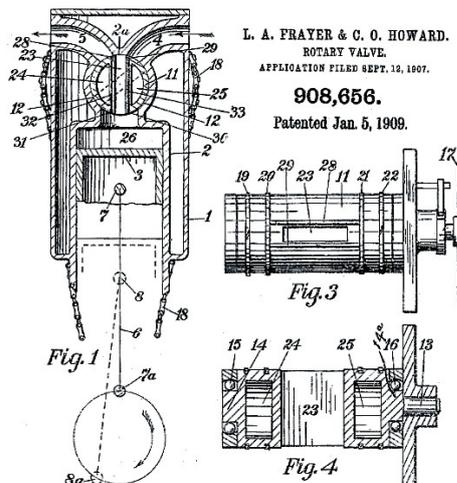


Figura 25. Patente Frayer y Howard.

Patente VALLILLEE válvula giratoria. Patente 7 Febrero 1911. Nº983,328

La válvula rotativa se sienta en la parte superior del cilindro. Se hace girar de forma intermitente a través de una leva y una palanca, que funciona con una unidad de trinquete en la parte superior del cilindro, la válvula sería estacionaria durante los tiempos de combustión en los que hay alta presión y giraría al tener menos presión, evitando problemas de excesivo rozamiento durante la combustión. Esta es la primera propuesta conocida del uso de mando intermitente en una válvula rotativa.

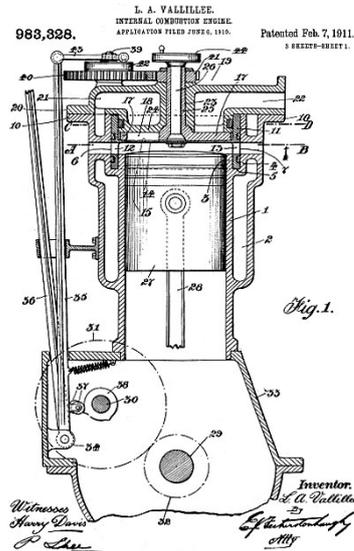


Figura 26. Patente Vallillee.

ITALA válvula giratoria (1911)

Itala era un fabricante de automóviles con sede en Turín, Italia, del 1904-1935. Se utilizaban dos válvulas rotativas, cada una colocada verticalmente y sirviendo a dos cilindros adyacentes. Cada cilindro tenía sólo un puerto, que llevaba al escape y a la admisión, mientras que la válvula tenía una división interna de modo que la admisión se aspira desde la parte inferior y los gases de escape pasan a través de la parte superior.

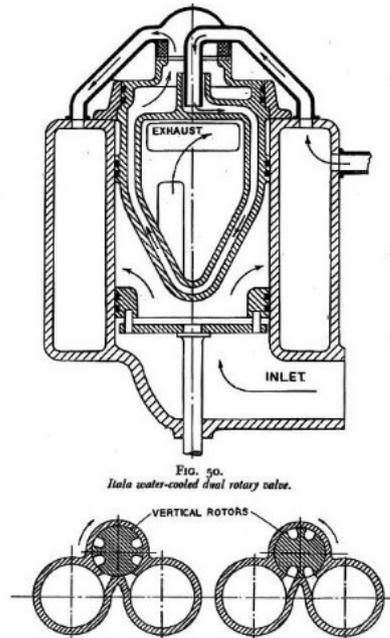


Figura 27. Motor con válvula giratoria del fabricante Itala.

Castiglione-BOLTON válvula giratoria (1912)

Este sistema montaba un cilindro en el cual habían mecanizado diverso orificios que serian los encargados de hacer la función de válvula. El cilindro era impulsado por un eje vertical a través de engranajes. Tenía una camisa de refrigeración por agua en su exterior. Este sistema tenía un complejo sistema de entrada y escape por lumbreras, mecanizado en el cilindro, que conectaba con el cilindro a través de un único puerto en la parte superior de la cámara de combustión.

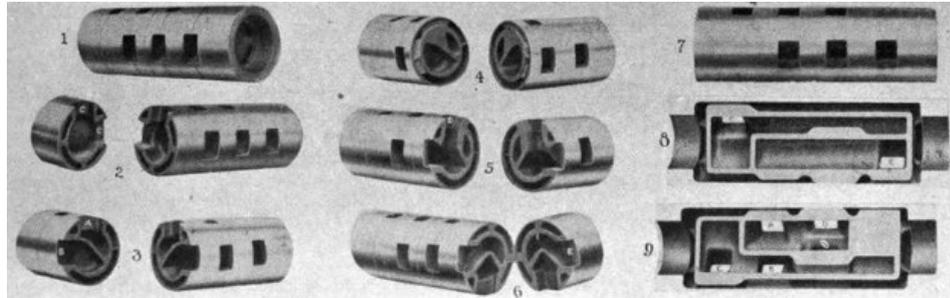


Figura 28. Sistem Castiglione- Bolton.

Darracq Henriod válvula giratoria (1912)

Fue un diseño francés, del fabricante Darracq. En 1912 la marca fabrico una gama de coches con este diseño de motor, pero con resultados bastante desastrosos, la patente de este diseño era Henriod.

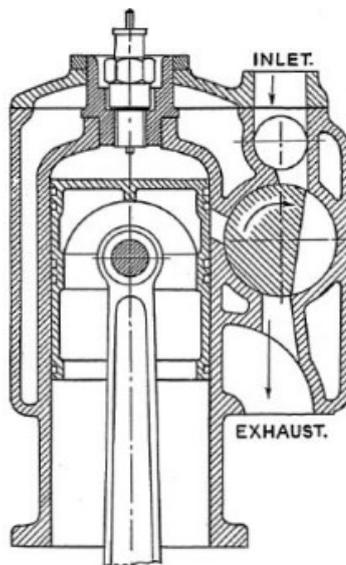


Figura 29. Modelo de válvula rotativa Henriod.

La válvula consistía en un cilindro con orificios mecanizados, los cuales al girar el cilindro de válvulas, se encaraban en los tiempos de escape y admisión, permitiendo el flujo de gases. La válvula se montaba en el lateral del cilindro, en donde había un orificio que comunicaba con el interior del cilindro. El pistón en su carrera ascendente tapaba el orificio, de forma que durante la combustión la válvula estaba protegida de las altas presiones. Uno de los errores más importantes era que en el espacio entre la válvula y el cilindro se acumulaba tanto mezcla limpia como gases de escape, según el último tiempo realizado, de forma que esto se mezclaba con otro tiempo, haciendo que el rendimiento fuera inferior.

Reynolds válvula giratoria (1912)

En este modelo se montaba una válvula en forma de disco, sobre cada cilindro, en la culata. Esta válvula solo tenía un orificio, y la culata tenía dos, de forma que al girar los orificios encaraban y se producían los tiempos, durante la compresión y combustión, ningún orificio coincidía. El movimiento del cigüeñal se transmitía, hasta las válvulas, por medio de un eje, montado en un cilindro falso colocado en el bloque motor, y luego por medio de engranajes hasta las válvulas. Esta variante de válvulas rotativas consiguió buenos resultados y se montó en diversos modelos de vehículos.

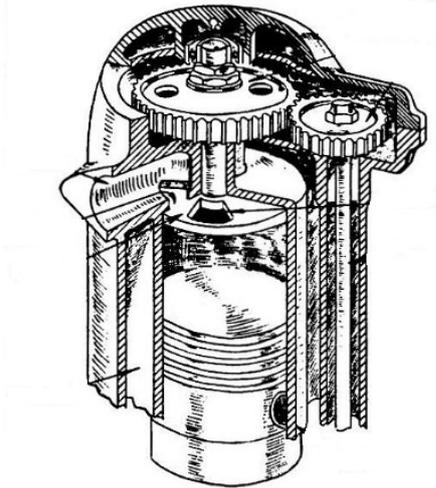


Figura 30. Motor con válvula giratoria Reynolds.

Mead válvula giratoria (1912)

Este sistema monta dos válvulas de pequeño tamaño, montadas a los dos lados de la cámara de combustión, la cámara dispone de dos orificios que comunican, cada uno, con una de las válvulas. Los orificios eran muy pequeños, por lo que se supone que el rendimiento y potencia no serían muy elevados, aunque los datos, que existen sobre estos modelos, afirman que tenían un buen rendimiento y alta durabilidad, para lo normal en estos tiempos.

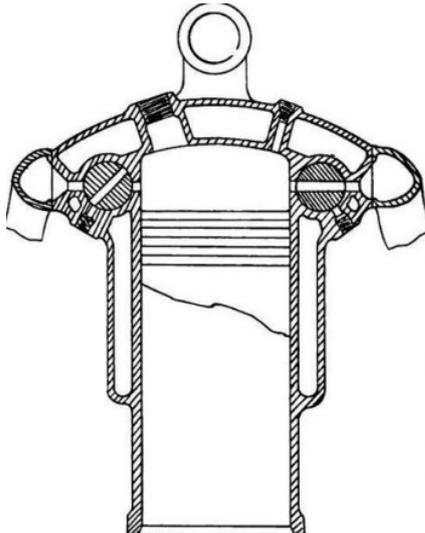


Figura 31. Motor con válvula giratoria Mead.

The silent valve company (1912)

Este sistema montaba válvulas cónicas en posición vertical, paralelas al cilindro, cada válvula comandaba dos cilindros. La conducción desde el cilindro hasta la válvula, se producía por medio de un conducto montado en la cámara de combustión.

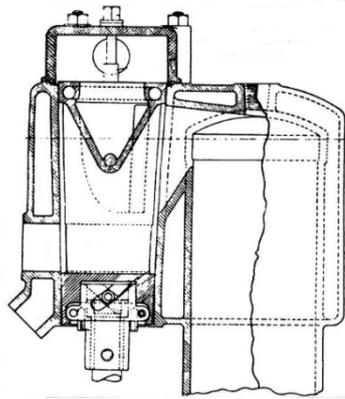


Figura 32. Válvula cónica The silent valve company.

Rotary Speedwell six (1915)

Este diseño se basa en la válvula giratoria de Mead, con algunas modificaciones, como: válvulas más grandes, una articulación en el cilindro de válvulas y un sistema de lubricación más eficiente. El Speedwell era el único coche en el mercado americano con motor de válvula rotativa.

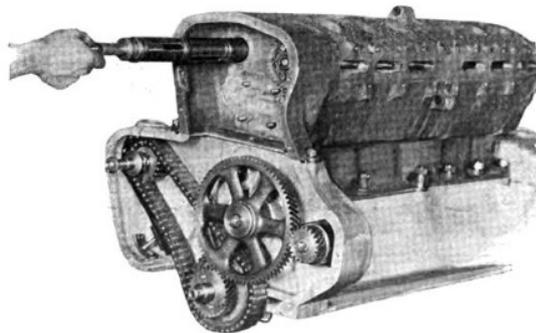


Figura 33. Motor Speedwell six con válvulas giratorias.



Figura 34. Speedwell con motor de válvula giratoria.

Patente MUELLER & SCHULER válvula giratoria (1915)

Esta versión de válvula giratoria se basa en el modelo de Reynolds, pero le añade un mecanismo de cruz de malta, de forma que el movimiento de las válvulas es secuencial, consiguiendo el mismo objetivo que en la patente de VALLILLEE.

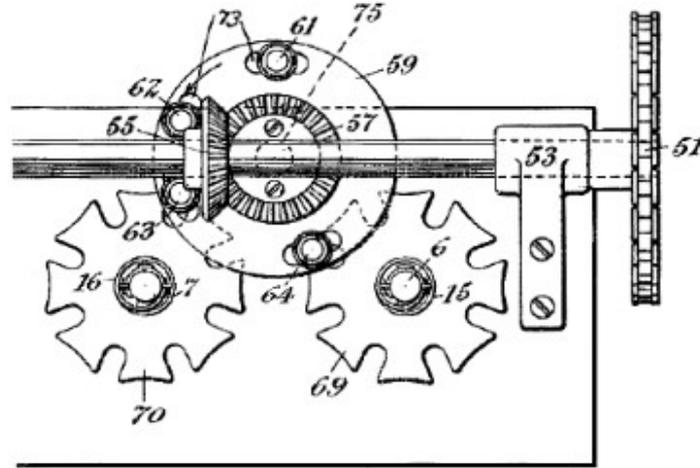


Figura 35. Válvula giratoria con mecanismo de cruz de malta.

Válvula rotativa de grafito (1917)

Este modelo es similar al modelo The silent valve company, con la diferencia de que la válvula está fabricada en grafito, por lo que es resistente al calor y auto lubricante, esta sería la principal diferencia y mejora del sistema, el resto del funcionamiento es básicamente igual.

Minerva rotary valve system (1925)

Este sistema montaba un cilindro con un rebaje por cada cilindro, al girar, el cilindro, el rebaje que correspondía al cilindro comunicaba primero el colector de escape con la cámara de combustión, al seguir girando se producía un cruce de válvulas, al comunicar al mismo tiempo con el colector de admisión, después se cerraba el escape y seguía girando hasta cerrar el paso a la admisión, que es cuando se produciría la compresión y combustión. Este sistema se montaba en la culata, justo sobre la cámara de combustión.

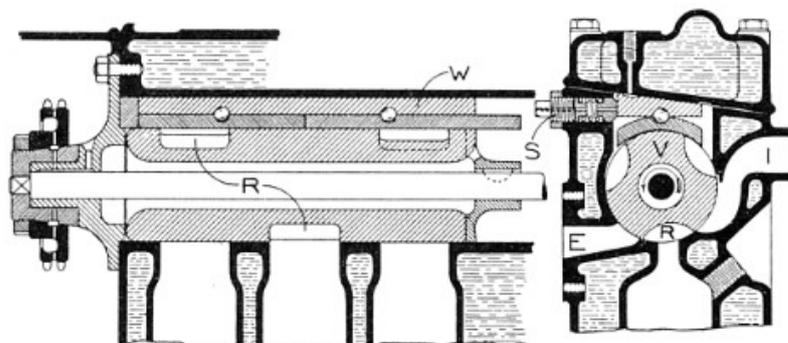


Figura 36. Esquema sistema Minerva.

Cross rotary valve system (1920-1940)

Este sistema es similar al Minerva rotary valve system, con la diferencia de que los gases de admisión llegan al cilindro a través del cilindro de válvulas, pasando por el centro del engranaje de accionamiento; en el caso de los de escape, también salen por el centro del cilindro de válvulas y van directos a la salida de escape.

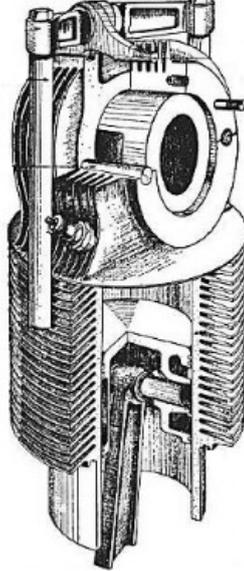


Figura 37. Sistema Cross de válvula giratoria.

Aspin rotary valve system (1933-1977)

Este diseño monta una válvula en forma de cono, en la culata, justo sobre el cilindro, con una única apertura que comunica el colector de escape y el de admisión en el tiempo correspondiente. Este sistema es similar a algunos anteriores, la verdadera innovación de este sistema son las pruebas con distintos materiales para la válvula, de forma que se redujera la fricción. Se utilizaron dos aleaciones para los prototipos: acero al níquel endurecido sobre una carcasa de aluminio-bronce, y un revestimiento de plomo-berilio en los rotores, estos materiales reducían la fricción y el gasto de aceite, al poder aumentar la fuerza de cierre, pero cuando estos recubrimientos se desgastaban volvían los problemas.

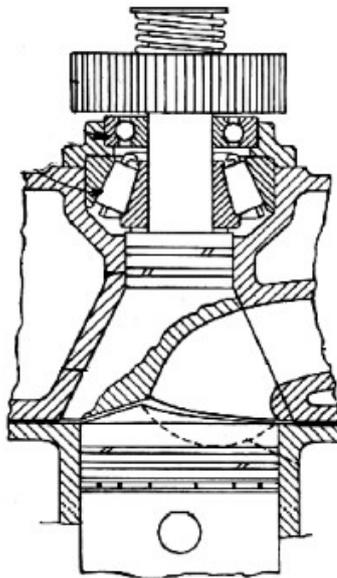


Figura 38. Sistema Aspin.

Froede rotary valve (1950)

Este sistema fue inventado y utilizado por la compañía alemana NSU, que fue el mayor constructor de motocicletas en el mundo por esta época. El sistema constaba de una válvula en forma de disco, montada en la culata sobre el pistón, con la diferencia de que el pistón estaba inclinado por lo que la válvula quedaba desplazada en la cámara de combustión. Tuvo éxito en algunas carreras, lo que no se repitió debido a la desaparición de NSU. NSU también introdujo el motor Wankel rotativo.

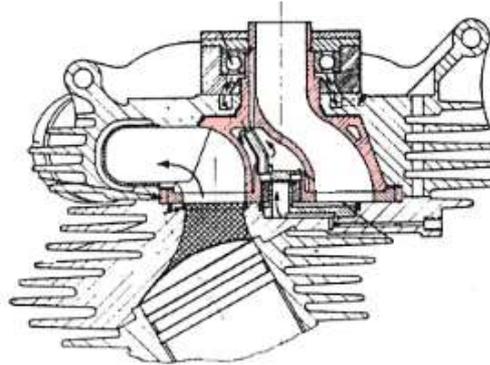


Figura 39. Sección del sistema de válvula rotativa de Froede.



Figura 40. Motocicleta NSU de competición.

Felix wankel rotary valves (1935-1950)

Felix Wankel, el creador del motor rotativo, participó en el desarrollo de válvulas de disco giratorio para su uso en aviones y torpedos. Existen datos de que trabajó en el motor del torpedo Junkers Jumo KM8. El desgaste de la válvula rotativa no era un problema, debido a la corta vida útil de un motor de torpedo.

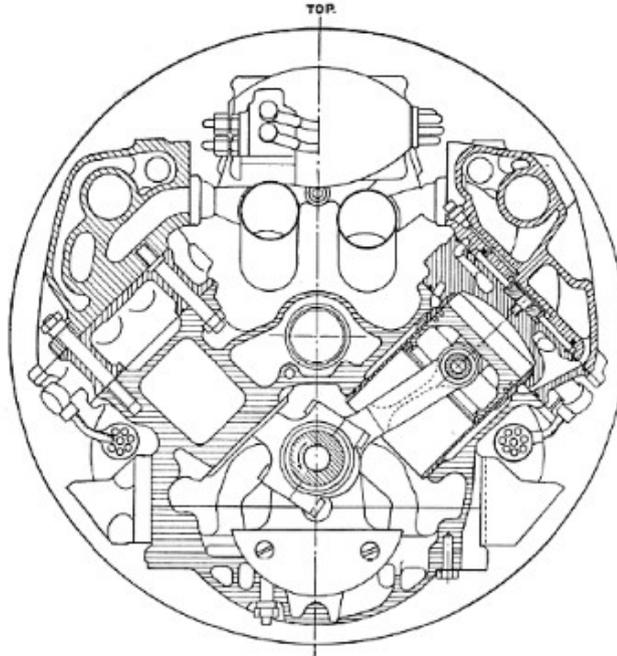


Figura 41. Motor en V con sistema de válvulas rotativas Wankel.

Mellors rotary valve system (1940)

Este sistema tiene una construcción parecida a la patente MEAD ROTARY VALVE, con el montaje de dos cilindros con válvulas, montados a ambos lados de la cámara de combustión, pero en este caso con orificios de mayor diámetro, y además incorporando un mecanismo de cruz de malta, que hace moverse a las válvulas con un movimiento de 90 grados, es decir, abierto o cerrado.

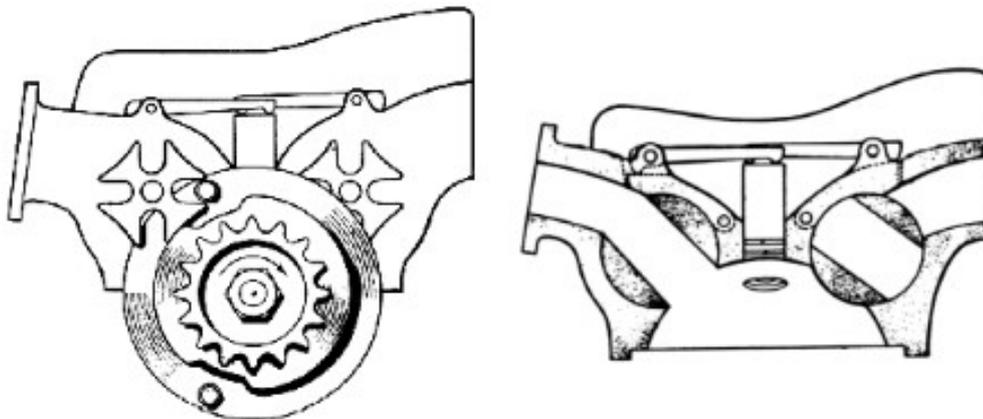


Figura 42. Sistema Mellors con mecanismo de cruz de malta.

Motor ESSO-Cross válvula giratoria (1975)

Es un motor nacido de la colaboración de ESSO y la Cross Manufacturing Company of Bath. Es un motor de cuatro cilindros que monta un sistema de válvulas giratorias de Cross. Además el cigüeñal es un sistema de manivela excéntrica. Este motor consiguió buenos resultados, aunque muy lejos de los esperados por los diseñadores.

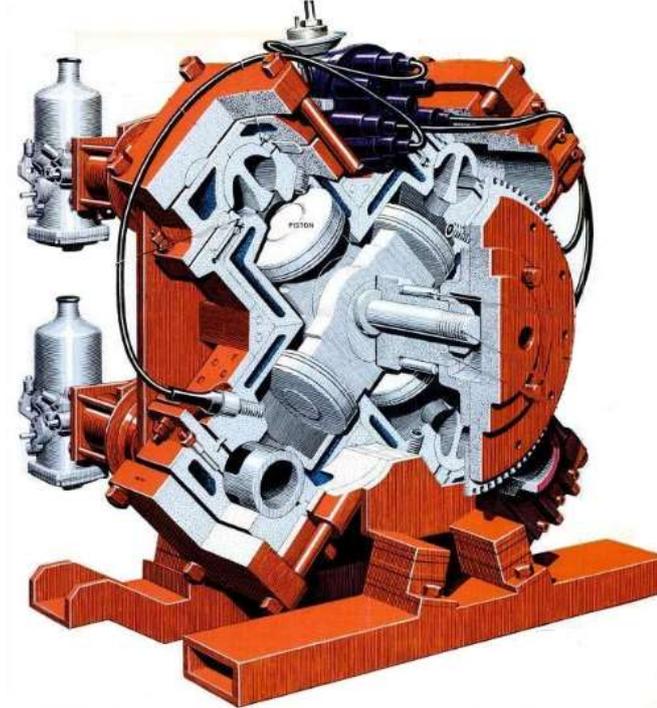


Figura 43. Motor ESSO-Cross.

Lotus rotary valve motor 2 tiempos (1991).

Este modelo de motor se centraba en un motor de dos tiempos sobrealimentado por un compresor, y en el que la admisión estaba controlada por una válvula giratoria de tipo Cross, y el escape se hacía de forma convencional por transferes realizados en la pared del cilindro.

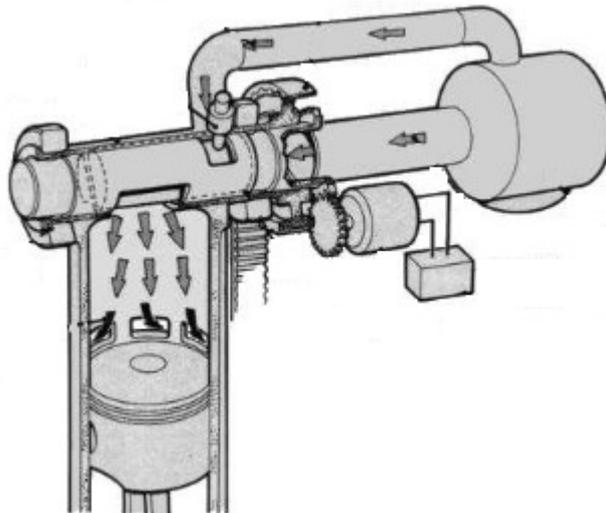


Figura 44. Motor 2 tiempos con admisión por válvula rotativa.

Sistema (CSRV) Coates Spherical Rotary Valve

Es un sistema desarrollado por Coates International, estos motores montan válvulas en forma de esfera, montadas sobre la cámara de combustión, consta de dos esferas por cilindro y las esferas van unida entre ellas, las de escape por un lado y las de admisión por otro, por medio de un eje, que es el que transmite el movimiento desde una cadena unida al cigüeñal.

Las pruebas y estudios realizados a estos motores han obtenidos resultados muy positivos, tales como: mejora importante del caudal de gases desplazado, posibilidad de trabajar a revoluciones muy superiores a un motor convencional (más del doble), capacidad de incrementar la relación de compresión de 10:1 hasta 15:1.

Este sistema no tiene aceite en la culata, monta casquillos de bronce para la fricción de las esferas, esto hace que el aceite no esté cerca de los puntos más calientes del motor, de forma que este puede durar más kilómetros sin ser sustituido.

Este sistema está en desarrollo y ya existen modelos operativos.

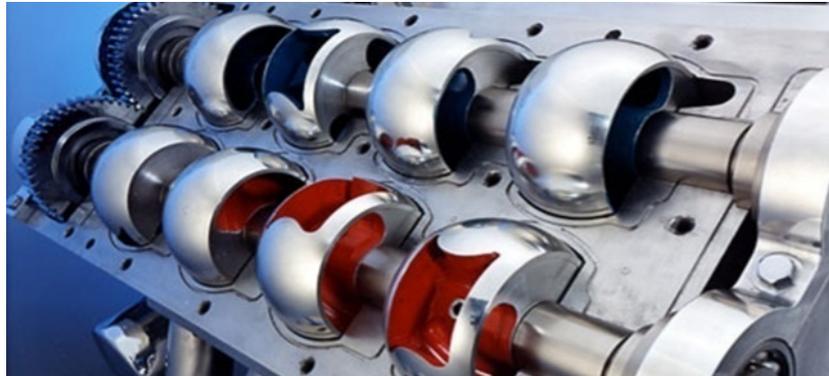


Figura 45. Motor con sistema CSRV.

4. Descripción del sistema con válvulas rotativas

El sistema de válvulas rotativas se basa en un motor de Yamaha SR 250cc, del cual se ha aprovechado casi todo el motor, menos la culata. La cual se ha diseñado desde cero, ésta nueva culata se monta en la misma disposición que la original, pero salvo por que realiza la misma función, es completamente diferente.

La principal diferencia es que las válvulas son unos discos, con unos orificios mecanizados, que tienen un movimiento rotatorio y son lo que permite controlar la entrada y salida de gases de la cámara de combustión. En los motores convencionales esto lo realizan unas válvulas en forma de seta, que tienen un movimiento alternativo, producido por unos mecanismos que transforman el movimiento rotatorio que llega desde el cigüeñal en alternativo. En esta nueva culata no es necesario el cambio de tipo de movimiento, simplemente se cambia la dirección de éste, por lo que se reduce el número de piezas en movimiento, con sus respectivos beneficios.

Para la sincronización del movimiento, entre el cigüeñal y las válvulas, se monta una cadena desde el engranaje original del cigüeñal, que transmite el movimiento hasta otro engranaje colocado en la culata, el cual está unido a un eje con un engranaje helicoidal. El engranaje helicoidal engrana con un engranaje unido a la válvula de escape, por temas de temperatura, y por último las dos válvulas tienen mecanizado un dentado en su periferia de forma que las dos engranan entre si y se mueven a la vez.

Además, este sistema no cuenta con lubricación directa en la culata. Las válvulas trabajan en seco, para evitar que entre aceite en la cámara de combustión. Y en la parte del mecanismo de distribución, puede llegar algo de aceite que puede arrastrar la cadena desde el cárter. Pero las piezas están diseñadas para trabajar con una pequeña cantidad de grasa. El sistema consistirá en una culata, provista de válvulas con forma de disco, con orificios mecanizados, para controlar el paso de mezcla y gases de escape, lo cual será la principal característica del sistema. Dado que la parte de la cámara de combustión que coincide con la culata seta plana, la cámara de combustión se mecanizara en la cabeza del pistón, con forma de semiesfera. La pieza que estará directamente en contacto con la cámara de combustión se denomina culatín, esta pieza separa las válvulas del pistón y la cámara de combustión. La bujía se colocara enroscada en el culatín de forma que la punta, donde se produce la chispa, quede en la cámara de combustión. El control de las válvulas se realizara mediante un mecanismo de engranajes, el cual engranara con las válvulas, además la sincronización entre el cigüeñal y el mecanismo de engranajes, se realizara por medio de una cadena.

El resto de elementos del motor se conservaran, considerando que el incremento de prestaciones y esfuerzos serán mínimos o nulos y por lo tanto soportaran los esfuerzos de igual manera que con el montaje original. Estas modificaciones permitirán reducir la altura de la culata, así como el número de elementos en movimiento. Se eliminaran los movimientos alternativos de las válvulas muelles y varillas, de forma que se reducirán ruidos y vibraciones al realizar todos los elementos movimientos rotativos.

Para la fabricación se estudiaran los esfuerzos que puede sufrir cada pieza, así como se dimensionara, seleccionara el material y el proceso de fabricación más idóneos para su fin. Para este fin se ha realizado el diseño 3D de cada elemento y se ha estudiado con diversos programas de selección de materiales, además se ha realizado la simulación de esfuerzos sobre las piezas más críticas del sistema y que son más propensas a sufrir problemas, deformaciones o roturas.

5. Descripción del motor original

El motor base es de Yamaha SR 250 Special del año 1983. La cilindrada es 239 cc³, que desarrolla una potencia máxima de 20 Cv a 7700 revoluciones. La refrigeración se realiza por aire. La sincronización entre el cigüeñal y las válvulas se realiza por medio de una cadena y monta un sistema de válvulas en la culata. La lubricación del motor es por aceite a presión.



Figura 46. Yamaha SR 250 Special.

En la siguiente tabla se exponen las principales características de este motor, en lo que se refiere a la parte del motor que genera la potencia:

Motor	Mono cilíndrico 4 tiempos S.O.H.C
Cilindrada	239 cc ³
Diámetro	73,5 mm
Carrera	56,5 mm
Cámara combustión	30,4 cm ³
Compresión	8,9:1
Potencia	20 CV a 7.700 rpm
Lubricación	A presión
Refrigeración	Aire
Distribución	Por cadena 90 eslabones
Adelanto admisión	28°
Retraso admisión	68°
Adelanto escape	64°
Retraso escape	32°
Cruce válvulas	60°

Tabla 1. Características motor Yamaha SR 250.

6. Elementos del sistema de distribución

Para la construcción de este nuevo sistema se han construido nuevas piezas y también se han utilizado piezas del motor base. Dado que un motor se compone de un gran número de piezas, solo se ha centrado en las que componen la parte de la combustión del motor, dejando aparte los sistemas de lubricación, refrigeración, caja de cambios, embrague, arranque, la parte ciclo y el chasis de la motocicleta.

Para la fabricación de los nuevos elementos, se ha procedido a su diseño y dimensionado, así como a la selección de material y proceso de fabricación. Como elementos nuevos tendremos toda la parte de la culata, válvulas, engranajes y elementos necesarios para su montaje y transmisión de movimiento.

Los nuevos elementos son:

-Culatín:

Este elemento consiste en una pieza plana con dos orificios mecanizados, uno de escape y otro de admisión. Va montado entre el cilindro y las válvulas de disco, mejorando así la estanqueidad del sistema.

El culatín aloja también las válvulas, por lo que esta mecanizado de forma que las válvulas encajan en su interior y se montan sobre él los ejes sobre los que giran las válvulas.

Además esta pieza soporta la temperatura y la presión de la combustión, reduciendo los esfuerzos de las válvulas.

-Junta culatín-cilindro:

Entre el culatín y el cilindro se monta una junta.

-Culata:

La culata consiste en una pieza con dos conductos mecanizados, que encaran con los orificios de admisión y escape del culatín, lleva mecanizados los apoyos, de la transmisión para la sincronización de la distribución. También tiene realizado un orificio por el que pasa el eje de la válvula de escape.

-Junta culatín-culata:

Entre la culata y el culatín se monta una junta.

-Tornillos culata-cilindro:

Se montan unos tornillos que unen el montaje de la culata, el culatín y el cilindro, así como las juntas correspondientes.

-Válvula de disco de escape:

La válvula consiste en un disco, con un orificio alargado y curvo, cuyo tamaño depende de los grados de avance y retardo que se desean, en este caso los grados serán igual a los originales; la forma del orificio, pretende conseguir el máximo llenado del cilindro, y evitar golpes del fluido al cerrar la válvula.

El eje de la válvula es la misma pieza que la válvula, por la parte superior mide varios centímetros, de forma que llega a la parte superior de la culata, donde se montara un engranaje, que es el encargado de transmitir el movimiento a las válvulas. Además, la válvula tendrá el borde mecanizado con forma de engranaje helicoidal, de forma que engrane con la válvula de escape y le transmita el movimiento.

-Válvula de disco de admisión:

La válvula consiste en un disco, con un orificio alargado y curvo, cuyo tamaño depende de los grados de avance y retardo que se desean, en este caso los grados serán igual a los

originales; la forma del orificio, pretende conseguir el máximo llenado del cilindro, y evitar golpes del fluido al cerrar la válvula.

El borde de la válvula tiene un dentado helicoidal que engrana con la válvula de admisión, de forma que se mueven de forma sincronizada.

-Engranaje válvula escape:

Este engranaje se monta en la parte superior del eje de la válvula de escape, las dos piezas se mueven solidarias gracias a un rebaje.

A su vez este engrana con un engranaje helicoidal, que es el que transmite el movimiento desde la cadena de distribución.

-Engranaje helicoidal + eje:

Para la transmisión, desde la cadena de distribución hasta la válvula de escape, se monta engranaje helicoidal, apoyado sobre rodamientos. El engranaje helicoidal engrana con el engranaje de la válvula de escape.

En el extremo que coincide con la cadena de distribución, se acopla, por medio de una chaveta, un piñón.

-Piñón superior:

Este piñón va montado en el extremo del engranaje helicoidal y por él pasa la cadena de distribución, por lo que el movimiento del cigüeñal llega hasta la culata.

-Rodamientos eje engranaje helicoidal-piñón superior:

El engranaje helicoidal se monta sobre 2 rodamientos.

-Tapa culata:

En la parte superior de la culata se monta una tapa, para proteger el mecanismo de distribución.

-Junta tapa culata:

La tapa de la culata se monta sobre una junta, para asegurar su correcto sellado.

-Pistón:

El pistón tiene las mismas características y dimensiones que el original, con la diferencia de que en su cabeza, al contrario de tener forma hemisférica hacia el exterior, tiene mecanizada la cámara de combustión con forma de semiesfera.

6.1. Cálculos justificativos

En el apartado de cálculos se ha procedido al cálculo aproximado de características importantes para la selección del material de cada elemento del nuevo sistema de distribución con válvulas de disco. Principalmente se ha realizado un cálculo estimado de la temperatura y presión de la combustión y como afecta a los distintos elementos, dado que no alcanza a todos por igual. También se ha procedido al cálculo de las relaciones de transmisión desde el cigüeñal hasta las válvulas de disco de forma que la sincronización del motor sea la óptima para un perfecto funcionamiento del motor.

Temperatura y presión máximas:

Temperatura máxima

El aire contenido en el motor se calienta en dos fases: en primer lugar durante la compresión y en segundo punto por la combustión de la mezcla.

Para calcular el incremento de temperatura en la compresión aplicamos la ley de Poisson.

$$T_B = T_A \left(\frac{V_A}{V_B} \right)^{\gamma-1} = T_A r^{\gamma-1}$$

T_B = Temperatura final

T_A = Temperatura inicial = 20°C

V_A = Volumen inicial

V_B = Volumen final

γ = Coeficiente de dilatación adiabática = 1,4

r = Relación de compresión = 8,9

$$T_B = 293,15 \text{ K} * 8,9^{1,4-1} = 702,82 \text{ K}$$

El segundo incremento de temperatura se produce por la combustión de la gasolina.

$$\frac{Q_C}{m} = \frac{nc_v (T_C - T_B)}{m} = \frac{c_v (T_C - T_B)}{P_m}$$

Q_C = Calor cedido

El cálculo del calor cedido es aproximado, dado que se ha considerado que el cilindro se llena por completo y que la mezcla es estequiometría, por lo que no se han considerado pérdidas.

-Mezcla estequiometría = 14,7/1 en lo que se refiere a masa, hemos realizado la conversión para la relación estequiometría en volumen, dado que es lo que se necesita para estos cálculos.

1kg de gasolina son 1470,59 cm³

1kg de aire son 816326,53 cm³

$$\frac{816326,53 \text{ cm}^3 * 14,7}{1470,59 \text{ cm}^3} = \frac{8159,99}{1} \text{ en cuanto volumen}$$

Tenemos un cilindro con un volumen de:

$$V_{cilindro} = \pi * \left(\frac{7,35 \text{ cm}}{2}\right)^2 * 5,65 \text{ cm} = 239,73 \text{ cm}^3$$

El volumen total se obtiene al sumarle el volumen de la cámara de combustión.

$$V_{total} = 239,73 \text{ cm}^3 + 30,40 \text{ cm}^3 = 270,13 \text{ cm}^3$$

Aplicando la relación estequiometria en función del volumen:

$$V_{gasolina} = \frac{270,13 \text{ cm}^3}{8159,99} = 0,033 \text{ cm}^3$$

Que en términos de masa es:

$$masa_{gasolina} = 0,033 \text{ cm}^3 * 0,68 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 0,0225 \text{ g}$$

Sabiendo el poder calorífico de la gasolina, 42500 J/g, obtenemos el calor cedido por esta cantidad de gasolina.

$$Q_C = 0,0225 \text{ g} * 42500 \frac{\text{J}}{\text{g}} = 956,25 \text{ J}$$

c_v = Capacidad calorífica molar

T_C = Temperatura final

T_B = Temperatura inicial = 429,67°C = 702,82 K

P_m = Peso molecular medio del aire = 28,97 $\frac{\text{g}}{\text{mol}}$

$$T_C = \frac{Q_C * P_m}{C_v} = \frac{956,25 \text{ J} * 28,97 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{20,775 \frac{\text{J}}{\text{K}} * \text{mol}} = 1333,46 \text{ K}$$

$$T_{max} = 702,82 \text{ K} + 1333,46 \text{ K} = 2036,78 \text{ K} = 1763,63^\circ\text{C}$$

Presión máxima

En cuanto a la presión, ésta también se incrementa en dos fases, pero teniendo la temperatura máxima se calcula la presión máxima directamente aplicando la ley de los gases ideales.

$$P_f = \frac{r * P_i * T_f}{T_i} = \frac{8,9 * 101,325 \text{ KPa} * 2036,78 \text{ K}}{293,15 \text{ K}} = 6265,57 \text{ KPa} = 62,66 \text{ bar}$$

Tanto en el cálculo de la temperatura como en el de la presión máxima hemos usado la aproximación de que la capacidad calorífica molar del aire es la misma a todas las temperaturas. Un cálculo preciso requiere usar tablas empíricas, los resultados podrían diferir en torno a un 10%.

Relaciones de transmisión

Para que el sistema de distribución con válvulas de disco este sincronizado con el cigüeñal, el cigüeñal debe de girar el doble de rápido que las válvulas. Se podría hacer que giraran a la misma velocidad, modificando el agujero de las válvulas se podría hacer, pero las válvulas serian más débiles, además con estas relaciones de transmisión se reduce el tamaño de elemento y del conjunto en general.

En el nuevo sistema de distribución por válvulas de disco las relaciones de transmisión hasta las válvulas son las siguientes:

Piñón cigüeñal (1) – Piñón superior (2):

La transmisión entre el piñón cigüeñal (1) y el piñón superior (2) se realiza por cadena dado que hay una distancia que salvar entre los dos piñones. En este caso la velocidad (n) es la misma para los dos elementos, por lo que el número de dientes (Z) será igual para los dos piñones. Esto también hace que el par (T) transmitido también sea el mismo.

$$\begin{aligned}n_1 &= n_2 \\T_1 &= T_2 \\Z_1 &= Z_2 = 16 \text{ dientes}\end{aligned}$$

Piñón superior (2) – Engranaje helicoidal (3):

En esta relación de transmisión los dos elementos están unidos por un eje, por lo que sus velocidades (n) serán iguales aunque el número de dientes será diferente. Al estar los dos elementos unidos por un eje el par (T) también se mantiene.

$$\begin{aligned}n_2 &= n_3 \\T_2 &= T_3 \\Z_2 &= 16 \text{ dientes} \\Z_3 &= 11 \text{ dientes}\end{aligned}$$

Engranaje helicoidal (3) – Engranaje helicoidal (4):

Esta transmisión se produce por un montaje de engranajes helicoidales con ejes perpendiculares de forma que además del cambio de velocidad (n), dado que queremos reducir la velocidad a la mitad, también se cambia la dirección del movimiento. Al variar la velocidad (n) el par también varía, debido a la conservación teórica de la potencia (P), para este cálculo se utiliza la velocidad angular (ω) en radianes por segundo.

$$\begin{aligned}Z_3 * n_3 &= Z_4 * n_4 \\n_4 &= \frac{n_3}{2} \\P_3 &= P_4 \\P &= T * \omega \\T_4 &= \frac{T_3 * \omega_3}{\omega_4} \\11 * n_3 &= Z_4 * \frac{n_3}{2} \\Z_4 &= 22 \text{ dientes}\end{aligned}$$

Engranaje helicoidal (4) – Válvula de escape (5):

La transmisión entre los elementos 4 y 5 se produce a través de un eje, por lo que sus velocidades de giro (n) y el par (T) se mantendrán, aunque el tamaño y número de dientes (Z) de los elementos son distintos. El número de dientes de la válvula de escape (Z_5) está determinado por el tamaño de la válvula.

$$\begin{aligned}n_4 &= n_5 \\T_4 &= T_5 \\Z_5 &= 25 \text{ dientes}\end{aligned}$$

Válvula de escape (5) – Válvula de admisión (6):

El movimiento entre los elementos 5 y 6 se transmite por un montaje de engranajes helicoidales, mecanizados en el borde de las válvulas. Dado que las dos válvulas tienen el mismo tamaño y deben moverse a la misma velocidad, las dos tienen el mismo número de dientes (Z) en el engranaje.

$$n_5 = n_6$$

$$T_5 = T_6$$

$$Z_5 = 25 \text{ dientes}$$

$$Z_6 = 25 \text{ dientes}$$

En la siguiente tabla se exponen el número de dientes de cada piñón o engranaje, la velocidad para una velocidad de cigüeñal de 1000 revoluciones por minuto (rpm) y el par (N*m) máximo del motor que se produce a 7700 rpm.

Nº Elemento	Denominación	Nº Dientes (Z)	Velocidad (rpm)	Par (Nm)
1	Piñón cigüeñal	Z1 = 16	1000	18,5
2	Piñón superior	Z2 = 16	1000	18,5
3	Engranaje Helicoidal	Z3 = 11	1000	18,5
4	Engranaje helicoidal	Z4 = 22	500	37,0
5	Válvula Escape	Z5 = 25	500	37,0
6	Válvula admisión	Z6 = 25	500	37,0

Tabla 2. Elementos de transmisión.

Tiempos de apertura y cierre de las válvulas

Para conseguir los tiempos de apertura y cierre de las válvulas de admisión y escape del sistema de válvulas de disco, las válvulas deben tener un agujero, cada una, que coincida con los colectores de escape y admisión durante el tiempo estipulado. Por esto las válvulas de escape y admisión tienen un orificio con forma redondeada pero alargada según el tiempo que se desea que se mantengan abiertas, en este caso se han conservado los tiempos de adelanto de la apertura y retraso del cierre de las válvulas.

Válvula de admisión.

En un motor teórico el tiempo de admisión dura lo que tarda en realizarse una carrera descendente del pistón, en grados de giro del cigüeñal son 180°. Pero en un motor real existe un adelanto a la apertura y un retraso al cierre, de forma que el llenado del cilindro se optimice, en el caso de este motor el avance es de 28° y el retraso al cierre es de 68°, por lo que el tiempo total de admisión es de:

$$180^\circ + 28^\circ + 68^\circ = 276^\circ \text{ del giro del cigüeñal}$$

Dado que las válvulas giran a la mitad de velocidad que el cigüeñal, los grados de giro de la válvula para el tiempo de admisión será la mitad, por lo tanto el orificio de la válvula debe estar realizado con una longitud que cubra un giro de 138° de la válvula.

$$\frac{276^\circ \text{ giro de cigüeñal}}{2} = 138^\circ \text{ giro válvula admisión}$$

Válvula de escape.

En un motor teórico el tiempo de escape dura lo que tarda en realizarse una carrera ascendente del pistón, en grados de giro del cigüeñal son 180°. Pero en un motor real existe un adelanto a la apertura y un retraso al cierre, de forma que el vaciado del cilindro se optimice, en el caso de este motor el avance es de 64° y el retraso al cierre es de 32°, por lo que el tiempo total de escape es de:

$$180^\circ + 64^\circ + 32^\circ = 276^\circ \text{ del giro del cigüeñal}$$

Dado que las válvulas giran a la mitad de velocidad que el cigüeñal, los grados de giro de la válvula para el tiempo de escape será la mitad, por lo tanto el orificio de la válvula debe estar realizado con una longitud que cubra un giro de 138° de la válvula.

$$\frac{276^\circ \text{ giro de cigüeñal}}{2} = 138^\circ \text{ giro válvula escape}$$

6.2. Selección de materiales

En este apartado se ha procedido a seleccionar el material más adecuado según los requisitos que debe cumplir cada pieza del nuevo sistema de distribución por válvulas de disco según su función y condiciones de funcionamiento. Para esto se ha utilizado el programa CES EDU PACK, el cual permite introducir diversas características sobre los materiales y el programa muestra que materiales pueden cumplir estas especificaciones, el elegir el material final depende de la comparación entre estos resultados y decidir el más idóneo para nuestro fin. Los parámetros introducidos además de basarse en los cálculos realizados también se han tomado las características que se utilizan normalmente para la selección de componentes de motores de combustión, de forma que se contaba con más datos para la selección.

Al final del apartado se expone una tabla con un resumen de los resultados obtenidos para cada Pieza, de forma que se ve más claramente la selección del material de cada pieza. Además de agruparlos por grupos de material de forma que a la hora de la selección del proceso de fabricación se agrupen las piezas con el mismo tipo de material y posiblemente el mismo proceso de fabricación.

Culatín:

-Características:

Este elemento forma parte de la cámara de combustión, por lo tanto debe soportar altas temperaturas y la presión de la combustión. Además al alojar las válvulas también debe ser resistente al desgaste por rozamiento, dado que funcionara sin lubricación, y permitir un buen ajuste entre él y las válvulas, para evitar pérdidas.

-Materiales utilizados actualmente:

Este elemento no existe en el modelo original, pero al ser parte de la cámara de combustión consideramos que sería una parte de la culata, por lo que consideraremos los materiales más comunes en la fabricación de culatas.

Las culatas se fabrican generalmente de fundición aleada con otros materiales, que añaden características de resistencia, rigidez y conductividad térmica. En otras ocasiones se usan aleaciones de aluminio, este material combina la ligereza con un alto grado de conductividad térmica. Esta característica es muy deseable puesto que nos asegura que el

calor de la combustión sea evacuado al exterior, evitándose la formación de puntos calientes que pueden ocasionar la detonación.

-Valores debe cumplir:

El culatín debe soportar las explosiones directamente, por lo que soporta, en algunos instantes, temperaturas de más de 2000 °C y presiones superiores a los 60bares, pero esto solo sucede durante la explosión y durante un tiempo muy corto, en el momento que la explosión desplaza al pistón, estos valores disminuyen rápidamente y realmente la cantidad de calor que se transmite al elemento es menor.

Observando las propiedades de los distintos materiales utilizados en la fabricación de cámaras de combustión, se observa que las características más importantes del material son:

Temperatura de fusión superior a los 1200 °C

Temperatura máxima de servicio por encima de los 300 °C

Resistencia la compresión superior a los 300 MPa

Resistencia a materiales corrosivos

Coefficiente de transmisión térmica superior a 120 W/m°C

Además, como este elemento estará en contacto directo con las válvulas, en constante movimiento, deberá tener un bajo coeficiente de rozamiento y una muy buena resistencia al desgaste, por lo que su dureza deberá ser elevada. Para asegurar que se cumplen estas características se han descartado los materiales no cerámicos.

Posibles materiales:

Utilizando el programa CES EDU PACK y aplicando los valores anteriores, se obtienen diversos resultados, los cuales están expuestos en la siguiente tabla, además en la tabla se añaden algunas propiedades de estos materiales.

Resultados:

Material	Precio (€/kg)	Densidad (kg/m³)	Dureza (HV)	Coefficiente expansión (°C⁻¹)
Nitruro de aluminio	77,6-124	3270-3330	1090-1200	4,6-4,8
Nitruro de aluminio (97)	77,6-124	3270-3330	998-1100	4,3-4,5
Nitruro de aluminio (AlN)	77,6-124	3210-3280	1140-1260	4,9-5,6
Berilio	31-46,6	2830-2880	1100-1300	7,4-7,7

Tabla 3. Posibles materiales del Culatín (1/2).

Material	Precio (€/kg)	Densidad (kg/m ³)	Dureza (HV)	Coefficiente expansión (°C ⁻¹)
Berilio (99)	31-46,6	2800-2900	517-571	6,2-8,9
Berilio (B995)	31-46,6	2800-2900	546-604	7,4-7,7
Berilio (BZ)	31-46,6	2980-3040	752-829	7,4-7,7
Grafito (puro)	8,39-12,7	2200-2260	4-50	0,6-4,3
Silicio	6,83-11,3	2280-2380	900-1020	2-3,2
Nitruro de silicio	32,3-49,4	2400-3280	1700-3050	3,2-3,3

Tabla 4. Posibles materiales del Culatín (2/2).

Material escogido:

Es el nitruro de silicio. Esto es debido a la combinación de propiedades que presenta. De los elementos propuestos por el programa de selección de materiales, es el que combina:

Elevada dureza: 1700-3050 HV, dependiendo de las proporciones de elementos químicos y del proceso de creación.

Bajo coeficiente de expansión: 3,2-3,3 °C⁻¹, al igual que la propiedad anterior, dependiendo de composición y creación.

Densidad ligeramente superior a otros materiales, pero compensado con el resto de propiedades.

Bajo coste: 32,3-49,4 €/kg, comparando con otros materiales de propiedades similares.

Elevada resistencia al choque térmico.

Junta culatín-cilindro:

-Características:

Este elemento se puede comparar directamente con la junta de culata original, dado que cumple las mismas funciones:

La junta de culata tiene la misión de hermetizar dos piezas claves del motor, el bloque y la culata, por su localización, debe de ser capaz de soportar altas temperaturas y de absorber las dilataciones diferentes entre dichas piezas, a eso debemos añadir que la dilatación de los materiales (normalmente aleación y fundición) en bloque y culata, genera tensiones por su diferente elongación debido al mayor coeficiente de dilatación del aluminio frente al hierro. En el caso de nuestro motor también debe soportar el aceite que puede salpicarle la cadena de distribución.

La junta se compone de dos partes, el anillo que se encarga de la estanqueidad de la cámara de combustión, el cual soporta las altas temperaturas y presiones de la combustión y una parte flexible, que se deforma al apretar los tornillos que unen el conjunto al bloque motor, el cual es resistente al aceite y hace hermética la unión entre el culatín y el cilindro.

-Materiales utilizados actualmente:

Dado que realiza la misma función que la junta de culata, consideramos los materiales utilizados actualmente en las juntas de culata.

Las juntas de culata están formadas por distintas partes y se fabrican de diferentes maneras:

Una de ellas es hacer la junta toda de un material, pero formada por diversas laminas de este material, los materiales suelen ser cobre o bronce ya que estos absorben bien las dilataciones y soportan bien la corrosión y la temperatura.

Otra forma es con diversos materiales, en la mayoría de casos un alma metálica perforada, con recubrimiento de un composite por ambos lados y unos aros metálicos para mantener la hermeticidad de las cámaras de combustión.

Los materiales utilizados en las juntas de culata se componían de un alto porcentaje de caucho aglomerado con fibras de aramida y cargas minerales, calandrados con un alma interior metálica en distintos tipos de acero. En la actualidad han cambiados los composites utilizados y el núcleo se fabrica de distintos metales. Los aros metálicos (acero) o aros de fuego tienen la función de proteger el material en la zona de cilindros y evitar el deterioro del material base de la junta, así como incrementar la presión superficial en la zona de cilindros, impidiendo la pérdida de compresión de la cámara de combustión.

-Valores debe cumplir:

-Aro de fuego:

Esta parte de la junta de culata debe soportar las temperaturas y altas presiones de la combustión, por lo que sus características serán similares a las del culatín pero sin la necesidad de un bajo coeficiente de rozamiento.

Temperatura de fusión superior a los 1200 °C

Temperatura máxima de servicio por encima de los 300 °C

Resistencia a la compresión superior a los 300 MPa

Resistencia a materiales corrosivos

-Núcleo:

El núcleo es el encargado de dar consistencia a la junta de culata, por lo que tiene que ser de un material resistente a las altas temperaturas y al aceite, además poseer una resistencia media a ser deformado, para permitir su manipulación, pero no muy alta, para que se deforme al apretar el culatín, de forma que adopte la forma de éste.

Temperatura de fusión superior a los 500 °C

Temperatura máxima de servicio por encima de los 150 °C

Resistencia a materiales corrosivos

Coefficiente de transmisión térmica superior a 50 W/m°C

-Recubrimiento núcleo:

El recubrimiento debe ser de un material resistente a las altas temperaturas y al aceite, además debe ser altamente deformable de forma que selle correctamente la unión entre el culatín y el cilindro.

Temperatura máxima de servicio por encima de los 150 °C

Resistencia a materiales corrosivos

Alta deformación elástica.

-Posibles materiales:

Aplicando los valores anteriores, se obtienen diversos resultados, los cuales están expuestos en la siguiente tabla

Aro de fuego:

Material	Precio (€/kg)	Coefficiente expansión ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
Acero ordinario de contenido intermedio en carbono	0,389-0,434	10-14
Nitruro de aluminio	77,6-124	4,3-5,6
Berilio	760-850	10-12
Fibras de carbono	18,8-110	0,01-0,4
Grafito	8,39-12,7	0,6-4,3
Molibdeno	26,7-30,9	4,8-6,2
Silicio	6,83-11,3	2-3,2
Carburo de silicio	10,9-15,5	2,7-4,5
Tungsteno	35,9-42,3	4-4,9

Tabla 5. Posibles materiales del aro de fuego.

Núcleo:

Material	Precio (€/kg)	Modulo flexión (GPa)	Coefficiente expansión ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
Acero bajo carbono	0,53-0,54	200-215	11,5-13
Fibras de carbono	18,8-25,2	225-245	0,2-0,4
Cromo	6,8-7,5	245-285	6-7
Carburo de silicio	10,9-15,5	350-461	2,7-5,1
Diboruro de titanio	14-20,2	500-545	4,6-4,7
Carburo de tungsteno	14-21,7	600-670	4,5-7,1

Tabla 6. Posibles materiales del núcleo.

Recubrimiento núcleo:

Material	Precio (€/kg)	Elongación (%)	Coefficiente expansión (°C ⁻¹)	Temperatura máxima servicio (°C)
Caucho acrílico	6,21-8,04	120-330	133-200	150-180
Polietileno clorado	2,58-3	680-720	160-200	120-150
ETFE	19,9-28,5	100-400	104-108	142-158
Caucho de etileno acrílico	6,44-8,86	181-440	130-200	150-160
Etileno propileno	2,97-3,72	315-700	140-210	150-300
Caucho de etileno y acetato de vinilo	3,47-5,31	200-440	160-190	137-160
Politetrafluoroetileno	16-24,2	250-330	83-105	196-215
Elastómero fluorado	3,76-6,33	80-300	250-300	227-287
Caucho nitrilo	12-22,9	200-700	170-237	140-160
PCTFE	82,5-99	80-250	64,8-126	181-199
PEBA	5,24-6,74	290-678	138-251	118-166
Elastómero perfluoro	374-1500	200-300	180-230	220-327
PFA	25,6-41,6	279-323	120-130	250-271
PTFE	9,92-12,6	160-400	120-180	250-290
PVDF	1,6-12,8	12-500	126-256	120-150
Silicona	7,87-12,3	270-800	250-300	190-250

Tabla 7. Posibles materiales del recubrimiento núcleo.

Material escogido:

Aro de fuego: Acero ordinario de contenido intermedio en carbono

Además de ser el material de menor coste que cumple con las condiciones necesarias para el aro de fuego de la junta culatín-cilindro, tiene un coeficiente de expansión bajo, aunque no sea el menor de los posibles materiales.

Núcleo: acero con bajo contenido en carbono.

Es el material de menor coste que cumple con las condiciones necesarias para el núcleo de la junta culatín-cilindro, posee un modulo de flexión adecuado para la manipulación de la junta y que puede recuperarse de la deformación y adaptarse a la relajación de los materiales tras el montaje.

Recubrimiento de núcleo: Elastómero fluorado.

Es de los materiales propuesto con un precio bajo, presenta unas cualidades de elongación en la media de los propuesto. Tiene un coeficiente de expansión alto comparado con el resto de materiales, pero esto favorece a la estanqueidad de la unión entre culatín y cilindro. Además es uno de los materiales con mayor temperatura máxima de servicio, lo cual favorece a conservar sus características durante el tiempo de funcionamiento.

Culata:

-Características:

En la nueva construcción la culata es la pieza más grande, y es la que contiene los colectores de admisión y escape, así como soporta el mecanismo de distribución y sella la cámara del culatín donde se alojan las válvulas de disco, por lo que es responsable del ajuste de las válvulas y de evitar pérdidas de compresión.

Este elemento soporta altas temperaturas, dado que está muy próxima a la cámara de combustión y los gases de escape salen a través de ella. Además, al ser una pieza grande y ser un motor de refrigeración por aire, será un punto importante para la cesión de calor al aire exterior, Por lo que en su parte exterior llevara mecanizadas unas aletas de refrigeración, para aumentar la superficie de contacto con el aire exterior.

-Materiales utilizados actualmente:

Este elemento realiza la misma función que la culata original, con la diferencia que ahora no forma parte de la cámara de combustión, por lo que las temperaturas son más bajas y no soportara las altas presiones de la combustión.

Las culatas se fabrican generalmente de fundición aleada con otros materiales, que añaden características de resistencia, rigidez y conductividad térmica. En otras ocasiones se usan aleaciones de aluminio, este material combina la ligereza con un alto grado de conductividad térmica. Esta característica es muy deseable puesto que nos asegura que el calor de la combustión sea evacuado al exterior, evitándose la formación de puntos calientes que pueden ocasionar la detonación.

-Valores debe cumplir:

Las características a tener en cuenta serán las de una culata convencional, sin tener encuentra las exigencias de la cámara de combustión, por lo que observando las características de los materiales utilizados actualmente en la fabricación de culatas y teniendo en cuenta que habrá un constante rozamiento con las válvulas y que no habrá lubricación, establecemos las siguientes características:

Temperatura de fusión superior a los 500 °C

Temperatura máxima de servicio por encima de los 150 °C

Resistencia la compresión superior a los 300 MPa

Resistencia a materiales corrosivos

Coefficiente de transmisión térmica superior a 100 W/m°C

Además, como este elemento estará en contacto directo con las válvulas, en constante movimiento, deberá tener un bajo coeficiente de rozamiento y una muy buena resistencia al desgaste, por lo que su dureza deberá ser elevada. Para asegurar que se cumplen estas características se han descartado los materiales no cerámicos.

-Posibles materiales:

Los resultados obtenidos por medio del programa CES EDUPACK son los expuestos en la siguiente tabla.

-Resultados:

Material	Precio (€/kg)	Densidad (kg/m ³)	Dureza (HV)	Coefficiente expansión (°C ⁻¹)
Nitruro de aluminio	77,6-124	3210-3330	998-1260	4,3-5,6
Berilio	31-46,6	2830-3040	517-1300	7,4-8,9
Grafito	8,39-12,7	2200-2260	4-50	0,6-4,3
Silicio	6,83-11,3	2280-2380	900-1020	2-3,2
Nitruro de silicio	32,3-49,4	2400-3280	1700-3050	3,2-3,3
Carburo de tungsteno-cobalto	52,3-98,8	14300-15400	1380-1940	4,6-5,1
Carburo de tungsteno-níquel	51-95,4	1460-1490	1480-1630	4,8-5

Tabla 8. Posibles materiales de la Culata.

Material escogido:

El material escogido es el nitruro de silicio. Esto es debido a la combinación de propiedades que presenta. De los elementos propuestos por el programa de selección de materiales, es el que combina:

Elevada dureza: 1700-3050 HV, dependiendo de las proporciones de elementos químicos y del proceso de creación. Solo superado por el diamante, descartado principalmente por su precio.

Bajo coeficiente de expansión: 3,2-3,3 °C⁻¹, al igual que la propiedad anterior, dependiendo de composición y creación.

Densidad ligeramente superior a otros materiales, pero compensado con el resto de propiedades.

Bajo coste: 32,3-49,4 €/kg, comparando con otros materiales de propiedades similares.

Elevada resistencia al choque térmico.

Junta culatín-culata:

-Características:

Este elemento es similar a la junta de culatín- cilindro, con la diferencia de que este no está en contacto directo con la cámara de combustión. Por lo que esta junta solo consta de la parte deformable de la junta.

-Materiales utilizados actualmente:

Este elemento no se utiliza en el montaje original, por lo que consideramos las características de la junta de culatín-cilindro, pero sin tener en cuenta el aro de fuego

-Valores debe cumplir:

La parte deformable de la junta está formada por dos elementos, por lo que los estudiamos por separado.

-Núcleo:

El núcleo es el encargado de dar consistencia a la junta, por lo que tiene que ser de un material resistente a las altas temperaturas y al aceite, además poseer una resistencia media a ser deformado, para permitir su manipulación, pero no muy alta, para que se deforme al apretar la culata, de forma que adopte la forma de ésta..

Temperatura de fusión superior a los 500 °C.

Temperatura máxima de servicio por encima de los 150 °C.

Resistencia a materiales corrosivos.

Coefficiente de transmisión térmica superior a 50 W/m°C.

-Recubrimiento núcleo:

Debe ser de un material resistente a las altas temperaturas y al aceite, además debe ser altamente deformable de forma que selle correctamente la unión entre la culata y el culatín.

Temperatura máxima de servicio por encima de los 150 °C.

Resistencia a materiales corrosivos.

Alta deformación elástica.

-Posibles materiales:

Con la ayuda de programa CES EDUPACK y aplicando las condiciones expuestas arriba se obtienen los siguientes resultados para las dos partes que forman la junta culatín-culata:

-Núcleo:

Material	Precio (€/kg)	Modulo flexión (GPa)	Coefficiente expansión (°C⁻¹)
Acero bajo carbono	0,53-0,54	200-215	11,5-13
Fibras de carbono	18,8-25,2	225-245	0,2-0,4
Cromo	6,8-7,5	245-285	6-7
Carburo de silicio	10,9-15,5	350-461	2,7-5,1
Diboruro de titanio	14-20,2	500-545	4,6-4,7
Carburo de tungsteno	14-21,7	600-670	4,5-7,1

Tabla 9. Posibles materiales del núcleo.

-Recubrimiento núcleo:

Material	Precio (€/kg)	Elongación (%)	Coefficiente expansión (°C ⁻¹)	Temperatura máxima servicio (°C)
Caucho acrílico	6,21-8,04	120-330	133-200	150-180
Polietileno clorado	2,58-3	680-720	160-200	120-150
ETFE	19,9-28,5	100-400	104-108	142-158
Caucho de etileno acrílico	6,44-8,86	181-440	130-200	150-160
Etileno propileno	2,97-3,72	315-700	140-210	150-300
Caucho de etileno y acetato de vinilo	3,47-5,31	200-440	160-190	137-160
Politetrafluoroetileno	16-24,2	250-330	83-105	196-215
Elastómero fluorado	3,76-6,33	80-300	250-300	227-287
Caucho nitrilo	12-22,9	200-700	170-237	140-160
PCTFE	82,5-99	80-250	64,8-126	181-199
PEBA	5,24-6,74	290-678	138-251	118-166
Elastómero perfluoro	374-1500	200-300	180-230	220-327
PFA	25,6-41,6	279-323	120-130	250-271
PTFE	9,92-12,6	160-400	120-180	250-290
PVDF	11,6-12,8	12-500	126-256	120-150
Silicona	7,87-12,3	270-800	250-300	190-250

Tabla 10. Posibles materiales del recubrimiento del núcleo.

-Material escogido:

-Núcleo: acero con bajo contenido en carbono. Además de ser el material de menor coste que cumple con las condiciones necesarias para el núcleo de la junta culatín-cilindro, posee un modulo de flexión adecuado para la manipulación de la junta y que puede recuperarse de la deformación y adaptarse a la relajación de los materiales tras el montaje.

-Recubrimiento de núcleo: Elastómero fluorado. Además de ser de los materiales propuesto con un precio bajo, presenta unas cualidades de elongación en la media de los propuestos. Tiene un coeficiente de expansión alto comparado con el resto de materiales, pero esto favorece a la estanqueidad de la unión entre culatín y cilindro.

Tornillos culata-cilindro:

-Características:

Los tornillos de culata son los elementos de conexión entre el bloque del motor, la junta de culata y la culata. La fuerza de apriete del tornillo es un factor importante para el sellado de la cámara de combustión, la cámara de las válvulas y el conducto de la cadena de distribución. Una función que debe cumplirse a la perfección con el motor tanto frío como extremadamente caliente, a bajas y altas presiones.

-Materiales utilizados actualmente:

En la actualidad se utiliza acero al carbono medio, dado que presenta unas óptimas cualidades de resistencia a la tracción para el montaje y funcionamiento del motor.

-Posibles materiales:

Los puntos más importantes, a la hora de seleccionar los tornillos adecuados, son:

Resistencia a la tracción: es la carga máxima antes de que se fracture.

Resistencia a la fatiga: es el esfuerzo máximo que puede soportar durante un número de ciclos.

Resistencia a la tracción superior a 1000 MPa

Limite elástico superior a 900 MPa

Punto de fusión superior a 500 °C

Temperatura deservicio superior a 150 °C

-Resultados:

Material	Precio (€/kg)	Densidad (kg/m³)	Resistencia fatiga para 10⁷ ciclos (MPa)	Coefficiente expansión (°C⁻¹)
Acero de baja aleación	0,419-0,464	7800-7900	248-700	10,5-13,5
Acero inoxidable	4,4-4,85	7600-8100	175-753	13-20
Acero ordinario de alto contenido en carbono	0,389-0,434	7800-7900	281-606	11-13,5
Acero ordinario de contenido intermedio en carbono	0,389-0,434	7800-7900	229-600	10-14
Aleaciones de titanio	16,6-18,3	4400-4800	589-617	8,9-9,6
Níquel	13-14,3	8830-8950	135-500	12-13,5
Superaleaciones de base níquel	15,6-17,2	750-8650	135-900	9-16

Tabla 11. Posibles materiales de los Tornillos culata-cilindro.

-Material escogido:

El acero ordinario de contenido intermedio en carbono es el material escogido. Dado que cumple con las condiciones de selección de materiales, y comparando los resultados obtenidos todos los materiales tienen características muy parecidas y este es el que tiene un precio inferior.

Válvula de disco de escape:

-Características:

Este elemento forma parte de la cámara de combustión, por lo tanto debe soportar altas temperaturas y la presión de la combustión. También salen los gases de escape, a alta temperatura a través de la válvula. Además al estar alojado en el culatín también debe ser resistente al desgaste por rozamiento, dado que funcionara sin lubricación, y permitir un buen ajuste entre ella y la cámara de las válvulas, para evitar pérdidas.

-Materiales utilizados actualmente:

Existen diferentes tipos de válvulas y se utilizan diferentes materiales según las especificaciones del motor en el que se monten. Estos son algunos de los tipos de válvulas que se usan en la actualidad:

Válvulas Monometálicas. Para las válvulas de admisión se suelen utilizar aceros templables al cromo-níquel-silicio, los que poseen excelentes propiedades mecánicas aunque no son tan buenos frente a la corrosión. Para las válvulas de escape se usan aceros inoxidables al cromo-níquel manganeso.

Válvulas Bimetálicas. De esta manera se consigue mayor resistencia a la corrosión a altas temperaturas en los aceros inoxidables austeníticos de la cabeza y elevada resistencia al desgaste en los aceros inoxidables martensíticos de los vástagos.

Válvulas con pastillas soldadas: se recurre a la soldadura de una pastilla sobre el extremo del vástago de válvulas fabricadas en aceros inoxidables (no templables) con el fin de que resistan al desgaste y los impactos.

Válvulas huecas rellenas con sodio: en los motores de gran potencia, sometidos a trabajos duros, se emplea este tipo especial de válvula que tiene la propiedad de autorefrigerarse a gran velocidad debido a un procedimiento consistente en rellenar el interior de las válvulas con sodio metálico. Por supuesto, las piezas están previamente ahuecadas. La autorefrigeración es posible porque el sodio es un excelente conductor térmico y su punto de fusión es muy bajo (98° C), virtud por la cual entra en función inmediatamente después de encendido el motor, conduciendo el calor desde la cabeza de la válvula hacia la tapa del cilindro a través de la guía.

Válvulas de titanio: sus principales ventajas son su bajo peso específico y su alta resistencia mecánica. Por estas virtudes es ampliamente difundida su utilización en autos de competición. Posee la desventaja de que su durabilidad es limitada.

En la actualidad se están montando experimentalmente válvulas cerámicas en motores de combustión. Esto reduce mucho el rozamiento entre la válvula y la guía, además reduce el peso de la válvula y mejora el comportamiento a altas temperaturas.

-Valores que debe cumplir:

La válvula de escape debe soportar las explosiones directamente, por lo que soporta, en algunos instantes, temperaturas de más de 2000 °C y presiones superiores a los 60bares, pero esto solo sucede durante la explosión y durante un tiempo muy corto, en el momento

que la explosión desplaza al pistón, estos valores disminuyen rápidamente y realmente la cantidad de calor que se transmite al elemento es menor.

Observando las propiedades de los distintos materiales utilizados en la fabricación de válvulas de escape, se observa que las características más importantes del material son:

Temperatura de fusión superior a los 1200 °C

Temperatura máxima de servicio por encima de los 300 °C

Resistencia a la compresión superior a los 300 MPa

Resistencia a materiales corrosivos

Coefficiente de transmisión térmica superior a 120 W/m°C

Además, como este elemento estará en contacto directo con la cámara de válvulas, en constante movimiento, deberá tener un bajo coeficiente de rozamiento y una muy buena resistencia al desgaste, por lo que su dureza deberá ser elevada. Para asegurar que se cumplen estas características se han descartado los materiales no cerámicos.

-Posibles materiales:

Los resultados obtenidos con el CES EDUPACK para la válvula de disco de escape son los expuestos en la siguiente tabla:

Material	Precio (€/kg)	Densidad (kg/m³)	Dureza (HV)	Coefficiente expansión (°C⁻¹)
Nitruro de aluminio	77,6-124	3270-3330	1090-1200	4,6-4,8
Nitruro de aluminio (97)	77,6-124	3270-3330	998-1100	4,3-4,5
Nitruro de aluminio (AlN)	77,6-124	3210-3280	1140-1260	4,9-5,6
Berilio	31-46,6	2830-2880	1100-1300	7,4-7,7
Berilio (99)	31-46,6	2800-2900	517-571	6,2-8,9
Berilio (B995)	31-46,6	2800-2900	546-604	7,4-7,7
Berilio (BZ)	31-46,6	2980-3040	752-829	7,4-7,7
Grafito (puro)	8,39-12,7	2200-2260	4-50	0,6-4,3
Silicio	6,83-11,3	2280-2380	900-1020	2-3,2
Nitruro de silicio	32,3-49,4	2400-3280	1700-3050	3,2-3,3

Tabla 12. Posibles materiales de la válvula de disco de escape.

-Material escogido:

El material escogido es el nitruro de silicio. Esto es debido a la combinación de propiedades que presenta. De los elementos propuestos por el programa de selección de materiales, es el que combina:

Elevada dureza: 1700-3050 HV, dependiendo de las proporciones de elementos químicos y del proceso de creación.

Bajo coeficiente de expansión: $3,2-3,3 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, dependiendo de composición y creación.

Densidad ligeramente superior a otros materiales.

Bajo coste: 32,3-49,4 €/kg, comparando con otros materiales de propiedades similares.

Elevada resistencia al choque térmico.

Válvula de disco de admisión:

-Características:

Este elemento forma parte de la cámara de combustión, por lo tanto debe soportar altas temperaturas y la presión de la combustión. A través de ella entran los gases de admisión, frescos, por lo que mejora su refrigeración. Además al estar alojado en el culatín también debe ser resistente al desgaste por rozamiento, dado que funcionara sin lubricación, y permitir un buen ajuste entre ella y la cámara de las válvulas, para evitar pérdidas.

-Materiales utilizados actualmente:

Estos son algunos de los tipos de válvulas que se usan en la actualidad:

Válvulas Monometálicas. Para las válvulas de admisión se suelen utilizar aceros templables al cromo-níquel-silicio, los que poseen excelentes propiedades mecánicas aunque no son tan buenos frente a la corrosión. Para las válvulas de escape se usan aceros inoxidables al cromo-níquel manganeso.

Válvulas Bimetálicas. De esta manera se consigue mayor resistencia a la corrosión a altas temperaturas en los aceros inoxidables austeníticos de la cabeza y elevada resistencia al desgaste en los aceros inoxidables martensíticos de los vástagos.

Válvulas con pastillas soldadas: se recurre a la soldadura de una pastilla sobre el extremo del vástago de válvulas fabricadas en aceros inoxidables (no templables) con el fin de que resistan al desgaste y los impactos.

Válvulas huecas rellenas con sodio: en los motores de gran potencia, sometidos a trabajos duros, se emplea este tipo especial de válvula que tiene la propiedad de autorefrigerarse a gran velocidad debido a un procedimiento consistente en rellenar el interior de las válvulas con sodio metálico. Por supuesto, las piezas están previamente ahuecadas. La autorefrigeración es posible porque el sodio es un excelente conductor térmico y su punto de fusión es muy bajo (98°C), virtud por la cual entra en función inmediatamente después de encendido el motor, conduciendo el calor desde la cabeza de la válvula hacia la tapa del cilindro a través de la guía.

Válvulas de titanio: sus principales ventajas son su bajo peso específico y su alta resistencia mecánica. Por estas virtudes es ampliamente difundida su utilización en autos de competición. Posee la desventaja de que su durabilidad es limitada.

En la actualidad se están montando experimentalmente válvulas cerámicas en motores de combustión. Esto reduce mucho el rozamiento entre la válvula y la guía, además reduce el peso de la válvula y mejora el comportamiento a altas temperaturas.

-Valores debe cumplir:

La válvula de admisión debe soportar las explosiones directamente, por lo que soporta, en algunos instantes, temperaturas de más de 2000 °C y presiones superiores a los 60bares, pero esto solo sucede durante la explosión y durante un tiempo muy corto, en el momento que la explosión desplaza al pistón, estos valores disminuyen rápidamente y realmente la cantidad de calor que se transmite al elemento es menor.

Dado que la válvula de admisión forma parte de la cámara de combustión y está en contacto con la válvula de escape, consideraremos que sus requisitos serán iguales a los de la válvula de escape, aunque su temperatura sea siempre inferior, dado que la entrada de aire fresco enfriara la válvula.

Temperatura de fusión superior a los 1200 °C

Temperatura máxima de servicio por encima de los 300 °C

Resistencia la compresión superior a los 300 MPa

Resistencia a materiales corrosivos

Coefficiente de transmisión térmica superior a 120 W/m°C

Además, como este elemento estará en contacto directo con la cámara de válvulas, en constante movimiento, para asegurar un bajo desgaste y un bajo coeficiente de rozamiento se han descartado los materiales no cerámicos.

-Posibles materiales:

Material	Precio (€/kg)	Densidad (kg/m3)	Dureza (HV)	Coefficiente expansión (°C⁻¹)
Nitruro de aluminio	77,6-124	3270-3330	1090-1200	4,6-4,8
Nitruro de aluminio (97)	77,6-124	3270-3330	998-1100	4,3-4,5
Nitruro de aluminio (AlN)	77,6-124	3210-3280	1140-1260	4,9-5,6
Berilio	31-46,6	2830-2880	1100-1300	7,4-7,7
Berilio (99)	31-46,6	2800-2900	517-571	6,2-8,9
Berilio (B995)	31-46,6	2800-2900	546-604	7,4-7,7
Berilio (BZ)	31-46,6	2980-3040	752-829	7,4-7,7
Grafito (puro)	8,39-12,7	2200-2260	4-50	0,6-4,3
Silicio	6,83-11,3	2280-2380	900-1020	2-3,2
Nitruro de silicio	32,3-49,4	2400-3280	1700-3050	3,2-3,3

Tabla 13. Posibles materiales de la válvula de disco de admisión.

-Material escogido:

El material escogido es el nitruro de silicio. Esto es debido a la combinación de propiedades que presenta. De los elementos propuestos por el programa de selección de materiales, es el que combina:

Elevada dureza: 1700-3050 HV, dependiendo de las proporciones de elementos químicos y del proceso de creación. Solo superado por el diamante, descartado principalmente por su precio.

Bajo coeficiente de expansión: $3,2-3,3 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, al igual que la propiedad anterior, dependiendo de composición y creación.

Densidad ligeramente superior a otros materiales, pero compensado con el resto de propiedades.

Bajo coste: 32,3-49,4 €/kg, comparando con otros materiales de propiedades similares.

Elevada resistencia al choque térmico.

Engranaje helicoidal de válvula de escape:

-Características:

Este elemento forma parte del sistema de transmisión de movimiento y desmultiplicación, el sistema consta de dos engranajes helicoidales con los dientes inclinados a 45° de forma que se consigue el cambio de dirección necesario para este tipo de montaje.

El engranaje va unido al eje de la válvula de admisión por medio de un rebaje y con un tornillo y arandela para evitar que se salga de su alojamiento.

-Materiales utilizados actualmente:

Se construyen engranajes de muy variados materiales y características, pero para el caso de los motores, los más utilizados son los fabricados con metales, en algunos casos existe la incorporación de carbono para mejorar aún más sus propiedades. Además se les aplican diversos tratamientos a los metales para cambiar sus propiedades mecánicas, como por ejemplo mejorar su ductilidad, dureza, resistencia al choque.

-Valores que debe cumplir:

El engranaje además de soportar la transmisión de fuerzas, también debe soportar las temperaturas que hay en la culata, por lo que debe soportar los parámetros siguientes, los cuales son parcialmente inferiores a los de la culata:

Temperatura de fusión superior a los $400 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura máxima de servicio por encima de los $150 \text{ } ^\circ\text{C}$

Resistencia a materiales corrosivos

Coefficiente de transmisión térmica superior a $60 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$

Modulo a cortante entre 40 y 100 GPa

Resistencia a la fatiga para 10^7 ciclos superior a 200 MPa

Tenacidad a la fractura superior a $100 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$

-Posibles materiales:

Los posibles materiales obtenidos con el CES EDUPACK, al introducirle los parámetros expuestos en el punto anterior, son los siguientes:

Material	Precio (€/kg)	Densidad (kg/m ³)	Resistencia a la fatiga para 10 ⁷ ciclos (Mpa)	Dureza (HV)
Acero ordinario de contenido intermedio en carbono	0,389-0,434	7800-7900	207-258	54-170
Cobalto	22,6-24,9	8800-8900	270-625	160-370
Níquel	13-21,2	8700-8950	140-670	75-360
Niobio	66,5-122	8400-10800	180-440	180-340
Aleación de Tungsteno-Cu	34-37,5	17100-17300	270-420	250-320
Aleación Tungsteno- Cu- Ni	31,4-34,6	15200-15400	250-385	330-370

Tabla 14. Posibles materiales del engranaje válvula de escape.

-Material escogido:

El acero al carbono es el material escogido. Dado que presenta unas buenas características y es mucho más barato que el resto de materiales. El inconveniente principal es que necesita de lubricación en la unión entre los engranajes, esto se solventara aplicando grasa para altas temperaturas en los engranajes, esta grasa deberá sustituirse periódicamente, pero será un proceso sencillo dado que la tapa superior del motor es fácil de desmontar.

En el caso de querer eliminar el inconveniente de tener que engrasar esta zona, se podrían utilizar aleaciones con cobre o materiales cerámicos.

Engranaje helicoidal + Eje:

-Características:

Este elemento forma parte del sistema de transmisión de movimiento y desmultiplicación, el sistema consta de dos engranajes helicoidales con los dientes inclinados a 45º de forma que se consigue el cambio de dirección necesario para este tipo de montaje. Este engranaje se une por un eje al piñón superior de la cadena de distribución.

-Materiales utilizados actualmente:

Se construyen engranajes de muy variados materiales y características, pero para el caso de los motores, los más utilizados son los fabricados con metales, en algunos casos existe la incorporación de carbono para mejorar aún más sus propiedades. Además se les aplican diversos tratamientos a los metales para cambiar sus propiedades mecánicas, como por ejemplo mejorar su ductilidad, dureza, resistencia al choque.

-Valores debe cumplir:

El engranaje además de soportar la transmisión de fuerzas, también debe soportar las temperaturas que hay en la culata, por lo que debe soportar los parámetros siguientes, los cuales son parcialmente inferiores a los de la culata:

Temperatura de fusión superior a los 400°C

Temperatura máxima de servicio por encima de los 150 °C

Resistencia a materiales corrosivos

Coefficiente de transmisión térmica superior a 60 W/m°C

Modulo a cortante entre 40 y 100 GPa

Resistencia a la fatiga para 10^7 ciclos superior a 200 MPa

Tenacidad a la fractura superior a $100 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$

-Posibles materiales:

Utilizando el programa CES EDU PACK y aplicando los valores anteriores, se obtienen diversos resultados, los cuales están expuestos en la siguiente tabla, además en la tabla se añaden algunas propiedades de estos materiales, los cuales deciden la elección del material final.

Resultados:

Material	Precio (€/kg)	Densidad (kg/m ³)	Resistencia a la fatiga para 10^7 ciclos (Mpa)	Dureza (HV)
Acero ordinario de contenido intermedio en carbono	0,389-0,434	7800-7900	207-258	54-170
Cobalto	22,6-24,9	8800-8900	270-625	160-370
Níquel	13-21,2	8700-8950	140-670	75-360
Niobio	66,5-122	8400-10800	180-440	180-340
Aleación de Tungsteno-Cu	34-37,5	17100-17300	270-420	250-320
Aleación Tungsteno- Cu- Ni	31,4-34,6	15200-15400	250-385	330-370

Tabla 15. Posibles materiales del engranaje helicoidal.

Material escogido:

El acero al carbono es el material escogido. Dado que presenta unas buenas características y es mucho más barato que el resto de materiales. El inconveniente principal es que necesita de lubricación en la unión entre los engranajes, esto se solventara aplicando

grasa para altas temperaturas en los engranajes, esta grasa deberá sustituirse periódicamente, pero será un proceso sencillo dado que la tapa superior del motor es fácil de desmontar.

En el caso de querer eliminar el inconveniente de tener que engrasar esta zona, se podrían utilizar aleaciones con cobre o materiales cerámicos.

Piñón superior:

-Características:

Este elemento forma parte del sistema de transmisión de la cadena de distribución y además va unido al eje engranaje helicoidal-piñón superior, por medio de una chaveta y con un tornillo.

-Materiales utilizados actualmente:

Se construyen piñones de muy variados materiales y características, pero para el caso de los motores, los más utilizados son los fabricados con metales, en algunos casos existe la incorporación de carbono para mejorar aún más sus propiedades. Además se les aplican diversos tratamientos a los metales para cambiar sus propiedades mecánicas, como por ejemplo mejorar su ductilidad, dureza, resistencia al choque.

También se utilizan piñones fabricados con materiales plásticos para partes de los motores donde las temperaturas son más bajas o trabajan sumergidos en algún líquido de forma que se refrigeran continuamente impidiendo que su temperatura aumente en exceso y reduzca sus propiedades mecánicas.

En aplicaciones con necesidad de propiedades térmicas más elevadas también se utilizan piñones fabricados con materiales cerámicos de forma que sus propiedades se conservan a temperaturas superiores a las que podría soportar un piñón metálico.

-Valores debe cumplir:

El engranaje además de soportar la transmisión de fuerzas, también debe soportar las temperaturas que hay en él la culata, por lo que debe soportar los parámetros siguientes, los cuales son parcialmente inferiores a los de la culata:

Temperatura de fusión superior a los 400 °C

Temperatura máxima de servicio por encima de los 150 °C

Resistencia a materiales corrosivos

Coefficiente de transmisión térmica superior a 60 W/m°C

Modulo a cortante entre 40 y 100 GPa

Resistencia a la fatiga para 10^7 ciclos superior a 200 MPa

Tenacidad a la fractura superior a $100 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$

-Posibles materiales:

Utilizando el programa CES EDU PACK y aplicando los valores anteriores, se obtienen diversos resultados, los cuales están expuestos en la siguiente tabla, además en la tabla se añaden algunas propiedades de estos materiales, los cuales deciden la elección del material final.

Resultados:

Material	Precio (€/kg)	Densidad (kg/m ³)	Resistencia a la fatiga para 10 ⁷ ciclos (Mpa)	Dureza (HV)
Acero ordinario de contenido intermedio en carbono	0,389-0,434	7800-7900	207-258	54-170
Cobalto	22,6-24,9	8800-8900	270-625	160-370
Níquel	13-21,2	8700-8950	140-670	75-360
Niobio	66,5-122	8400-10800	180-440	180-340
Aleación de Tungsteno-Cu	34-37,5	17100-17300	270-420	250-320
Aleación Tungsteno- Cu- Ni	31,4-34,6	15200-15400	250-385	330-370

Tabla 16. Posibles materiales del piñón superior.

Material escogido:

El acero al carbono es el material escogido. Dado que presenta unas buenas características y es mucho más barato que el resto de materiales. Al formar parte del sistema de distribución por cadena, la cadena en la parte inferior pasa por el cárter y se impregna con aceite y al pasar por el piñón lubrica la zona de contacto entre metales.

Rodamientos eje engranaje helicoidal-piñón superior:

-Características:

Es necesario la colocación de rodamientos entre los soportes del eje engranaje helicoidal-piñón superior, que son parte de la culata, y el eje engranaje helicoidal-piñón superior, dado que los soportes son de un material cerámico y el eje engranaje helicoidal-piñón superior es metálico, por lo que la dureza de los soportes es superior a la del tornillo, y esto provocaría el desgaste del tornillo, por lo que debería ser sustituido periódicamente. Para evitar esto se colocaran dos rodamientos, alojados en los soportes realizados en la culata. Se opta por rodamientos y no por cojinetes, dado que trabajarán sin aceite.

-Materiales utilizados actualmente:

Para la fabricación de rodamientos se utiliza una gran variedad de materiales, desde plásticos y composites, pasando por su fabricación con metales, hasta los rodamientos cerámicos, todo depende de la utilidad que se le vaya a dar, cargas soportadas, temperaturas, lubricación, etc.

-Valores debe cumplir:

Los rodamientos deben soportar las revoluciones del eje engranaje helicoidal-piñón superior, además de las fuerzas producidas por la transmisión de potencia, así como las temperaturas de la parte alta de la culata.

-Posibles materiales:

Para la selección de los rodamientos, consultaremos bases de datos de algunos fabricantes de rodamientos y seleccionaremos los que más se ajusten a nuestro sistema.

Resultados:

Material	Precio (€/kg)	Densidad (kg/m ³)	Resistencia a la fatiga para 10 ⁷ ciclos (Mpa)	Dureza (HV)
Acero ordinario de alto contenido en carbono	0,532-0,541	7800-7900	281-606	160-650
Cobalto	22,6-24,9	8800-8900	270-625	160-370
Níquel	13-21,2	8700-8950	140-670	75-360
Niobio	66,5-122	8400-10800	180-440	180-340
Aleación Tungsteno-Cu	34-37,5	17100-17300	270-420	250-320
Aleación Tungsteno- Cu-Ni	31,4-34,6	15200-15400	250-385	330-370

Tabla 17. Posibles materiales de los rodamientos.

-Material escogido:

El acero al carbono es el material escogido. Dado que presenta unas buenas características y es mucho más barato que el resto de materiales. Los rodamientos se montaran con grasa en su interior como método de lubricación y unos retenes se encargaran de que la grasa se quede en los rodamientos.

Tapa culata:

-Características:

La tapa de la culata tiene la función de cubrir los elementos de la transmisión de movimiento, de forma que impide la entrada de elementos externos al motor, así como evita el contacto fortuito del usuario del motor.

-Materiales utilizados actualmente:

En la actualidad se utilizan tanto tapas metálicas, como plásticos y composites, dado que estas tapas no realizan ninguna función estructural, ni suelen soportar otros elementos.

-Valores debe cumplir:

La tapa de culata debe realizar un correcto sellado con la culata, pero para esto se ha colocado una junta de estanqueidad, además debe soportar las temperaturas a las que esta la culata, dado que están en contacto.

La tapa de la culata no tiene grandes requisitos, optaremos por materiales de poco peso, y se realizara de poco espesor, siempre teniendo en cuenta que debe poder soportar pequeños impactos durante el uso de la motocicleta.

Temperatura de fusión superior a los 300 °C

Temperatura máxima de servicio por encima de los 100 °C

-Posibles materiales:

Utilizando el programa CES EDU PACK y aplicando los valores anteriores, se obtienen los siguientes resultados.

Material	Precio (€/kg)	Densidad (kg/m ³)
LCP	9,61-18,9	1500-1870
PCT	3,16-5,33	1320-1720
PEEK	54,6-77,9	1300-1540
PEK	51,8-85,7	1290-1620
PEKK	56,3-78,1	1350-1620
PFA	25,6-41,6	2120-2170
PI	77,7-117	1330-1670
Mezcla Poliéster +PC	3,89-4,36	1440-1510
PPA	6,03-10,8	1100-1830
PPS	7,22-11,7	1520-1860
PTFE	9,92-12,6	2180-2300

Tabla 18. Posibles materiales de la tapa culata.

Material escogido:

La mezcla de poliéster + PC combina una baja densidad con un bajo precio comparando con el resto de posibles materiales además de cumplir las exigencias iniciales, por eso es el material elegido.

Junta tapa culata:

-Características:

Esta junta es similar a la junta culatín-culata, con la diferencia que no necesita una resistencia tan elevada, por lo que el núcleo metálico no será necesario, solo utilizaremos el recubrimiento del núcleo, como junta.

-Materiales utilizados actualmente:

Se utiliza todo tipo de materiales elásticos, con buenas características para ajustarse a las dos superficies entre las que se encuentra y que eviten la entrada o salida de sustancias, además tienen que soportar las temperaturas de las piezas con las que están en contacto.

-Valores debe cumplir:

La junta debe ser de un material resistente a las altas temperaturas y al aceite.

Temperatura máxima de servicio por encima de los 150 °C.

Resistencia a materiales corrosivos.

Alta deformación elástica.

-Posibles materiales:

Los materiales obtenidos con la ayuda del programa CES EDUPACK son los siguientes:

Material	Precio (€/kg)	Elongación (%)	Coefficiente expansión (°C ⁻¹)	Temperatura máxima servicio (°C)
Caucho acrílico	6,21-8,04	120-330	133-200	150-180
Polietileno clorado	2,58-3	680-720	160-200	120-150
ETFE	19,9-28,5	100-400	104-108	142-158
Caucho de etileno acrílico	6,44-8,86	181-440	130-200	150-160
Etileno propileno	2,97-3,72	315-700	140-210	150-300
Caucho de etileno y acetato de vinilo	3,47-5,31	200-440	160-190	137-160
Politetrafluoroetileno	16-24,2	250-330	83-105	196-215
Elastómero fluorado	3,76-6,33	80-300	250-300	227-287
Caucho nitrilo	12-22,9	200-700	170-237	140-160
PEBA	5,24-6,74	290-678	138-251	118-166
PFA	25,6-41,6	279-323	120-130	250-271
PTFE	9,92-12,6	160-400	120-180	250-290
PVDF	11,6-12,8	12-500	126-256	120-150
Silicona	7,87-12,3	270-800	250-300	190-250

Tabla 19. Posibles materiales de la junta tapa de culata.

-Material escogido:

El elastómero fluorado además de ser de los materiales propuesto con un precio bajo, presenta unas cualidades de elongación en la media de los propuesto. Tiene un coeficiente de expansión alto comparado con el resto de materiales, pero esto favorece a la estanqueidad de la unión entre culata y la tapa. Además es uno de los materiales con mayor temperatura máxima de servicio, lo cual favorece a conservar sus características durante el tiempo de funcionamiento.

Pistón:

El pistón es un elemento nuevo, pero se mantiene el material, forma y medidas del elemento original, con la diferencia que en la parte superior, se le ha mecanizado la cámara de combustión, realmente cambiara su forma interior, pero exteriormente es prácticamente idéntico al original. En este caso el material utilizado es aleación de aluminio para fundición.

RESUMEN SELECCIÓN MATERIALES

En la siguiente tabla se muestra la selección de materiales, se han agrupado las piezas que se fabricaran en el mismo material, en la mayoría de casos el proceso de fabricación será el mismo.

Pieza	Subpieza	Material
Culatín		Nitruro de silicio
Culata		
Válvula de disco de escape		
Válvula de disco de admisión		
Engranaje helicoidal de la válvula de escape		Acero ordinario de contenido intermedio en carbono
Engranaje helicoidal + eje		
Piñón superior		
Tornillos culata-cilindro		
Rodamientos		Acero ordinario de alto contenido en carbono
Junta culatín-cilindro	Aro de fuego	Acero contenido intermedio en carbono
	Núcleo	Acero bajo contenido en carbono
	Recubrimiento núcleo	Elastómero fluorado
Junta tapa culata		
Junta culatín-culata	Recubrimiento núcleo	Acero bajo contenido en carbono
	Núcleo	
Tapa culata		Mezcla poliéster + PC
Pistón		Aleación de aluminio para fundición

Tabla 20. Resumen selección de materiales.

Una vez escogido el material para cada pieza, estas son las descripciones abreviadas de cada material, sin entrar en detalle de las características de cada material. Además las características definitivas de cada material deberían determinarse por medio de pruebas sobre

un prototipo operativo o realizando los cálculos de todos los parámetros del motor, cosa que en este proyecto no se ha abarcado todo.

Nitruro de silicio: es la cerámica estructural dominante para los usos con alta tensión mecánica y térmica como motores de combustión. Sus características son propensas para aplicaciones con alta tensión mecánica a temperatura ambiente y a temperaturas elevadas, posee buena resistencia a la oxidación y al desgaste a altas temperaturas, alta resistencia al choque térmico, resistencia excelente a la abrasión y a la corrosión, baja densidad lo que implica un bajo momento de inercia. Además, se fabrica de materias primas abundantes.

Acero bajo contenido en carbono: contienen entre un 0,008 % y un 0,25 % de Carbono. Presentan una buena ductilidad y tenacidad, sin embargo presentan una resistencia baja siendo relativamente blandos. Al alearse con otros metales pueden elevar su resistencia y otras propiedades. Presentan facilidad de mecanizado y buena soldabilidad.

Acero ordinario de contenido intermedio en carbono: contienen entre un 0,25 % y 0,6 % de Carbono. Se usan en aplicaciones en que se requieren resistencias mayores que los aceros de bajo contenido en Carbono. Pero presentan menor ductilidad y maleabilidad. Al añadir ciertos materiales se mejora su capacidad de recibir tratamientos térmicos.

Acero ordinario de alto contenido en carbono: tienen contenidos en carbono superiores al 0,6 %. Se utilizan en aplicaciones donde se requiere una elevada resistencia, rigidez y dureza. Normalmente se utilizan aleados con otros materiales para mejorar sus propiedades según la aplicación que se le va a dar.

Elastómero fluorado: la abreviatura internacional es FKM (Fluor Karbon Monomer) y el nombre más utilizado es cauchos fluorados. Son un tipo de goma utilizada para la fabricación de repuestos industriales y empaquetaduras de los cierres de ejes, para impedir la fuga de fluidos. Pueden tolerar combustibles, aceites, productos químicos y disolventes.

Mezcla poliéster + PC (reforzado con fibra de vidrio al 30 %): Mezcla de policarbonato con poliéster con un 30 % de fibras de vidrio a modo de refuerzo. Esta mezcla combina las propiedades resistentes del poliéster con fibra de vidrio y el policarbonato aporta la impermeabilización.

Aleación de aluminio para fundición: se encuentran a menudo en partes de automóviles y engranajes, y se utilizaban en la fabricación de instrumentos quirúrgicos en el pasado. Generalmente son más fuertes y más ligeros que la mayoría de los materiales a base de zinc, pero son más caros de crear. El uso de aleaciones de aluminio reduce la necesidad de tratamientos de acabado, se suele alearse con cobre. También se puede alearse con otros elementos como: magnesio, para mejorar su resistencia a la tracción, o níquel, para aumentar la rigidez y proporcionar un acabado superior.

6.3. Simulación y verificación de espesores.

En este apartado se exponen y analizan las simulaciones realizadas sobre las piezas más críticas del nuevo sistema, en las cuales se aplica las fuerzas a las que van a ser sometidas durante su funcionamiento. Las simulaciones se han realizado con el modulo de simulaciones del programa de diseño 3D Solid Works.

Las simulaciones se han realizado sobre los elementos que soportan las explosiones del motor y sobre los elementos de transmisión de movimiento. De esta forma se ha estudiado el comportamiento de estas piezas durante el funcionamiento.

Elemento afectado por la combustión.

En este nuevo sistema los elementos que intervienen en la combustión son: culatín, válvula de escape, válvula de admisión, pistón y cilindro. Aunque los cálculos se han realizado sobre el culatín y las válvulas, ya que el pistón y el cilindro conservan las medidas y material original y dado que no se han modificado las prestaciones, deberían resistir las explosiones.

En primer lugar se ha estudiando el comportamiento del culatín. Se le ha aplicado, sobre su parte inferior, la presión máxima calculada en el apartado de Cálculos que es de 6265,57 KPa. Con el modulo de simulación se han obtenido dos imágenes en las cuales se puede observar el reparto de tensión sobre la pieza y la deformación que se produce en cada punto del elemento. De esta forma se puede observar si algún punto superar el límite elástico o si se deforma en exceso durante el momento de máxima presión de la combustión.

-Datos de la simulación del culatín.

En el caso del culatín se simula la fuerza que produce la combustión sobre su parte inferior. Los datos introducidos en el programa Solid Works para crear la simulación son los expuestos en la tabla 21.

Material	Nitruro de silicio	Coefficiente de Poisson	0,270
Densidad	3180 kg/m ³	Límite elástico	255 MPa
Coefficiente de expansión térmica	3,3 C ⁻¹	Tensión de rotura	255 MPa
Conductividad térmica	0,031 kW/m·C	% de elongación	0,085
Calor específico	840 J/kg·C	Carga aplicada	6265,57 KPa
Modulo de elasticidad	295000 MPa	Lugar aplicación carga	Parte inferior del culatín

Tabla 21. Datos simulación del culatín.

En la primera imagen se puede observar el reparto de tensiones sobre el culatín, la grafica del lado derecho de la imagen informa del valor que corresponde a cada color y la flecha roja indica el límite elástico del material escogido. La deformación que se observa en la imagen esta a escala, de forma que se pueda observar los puntos críticos de la pieza.

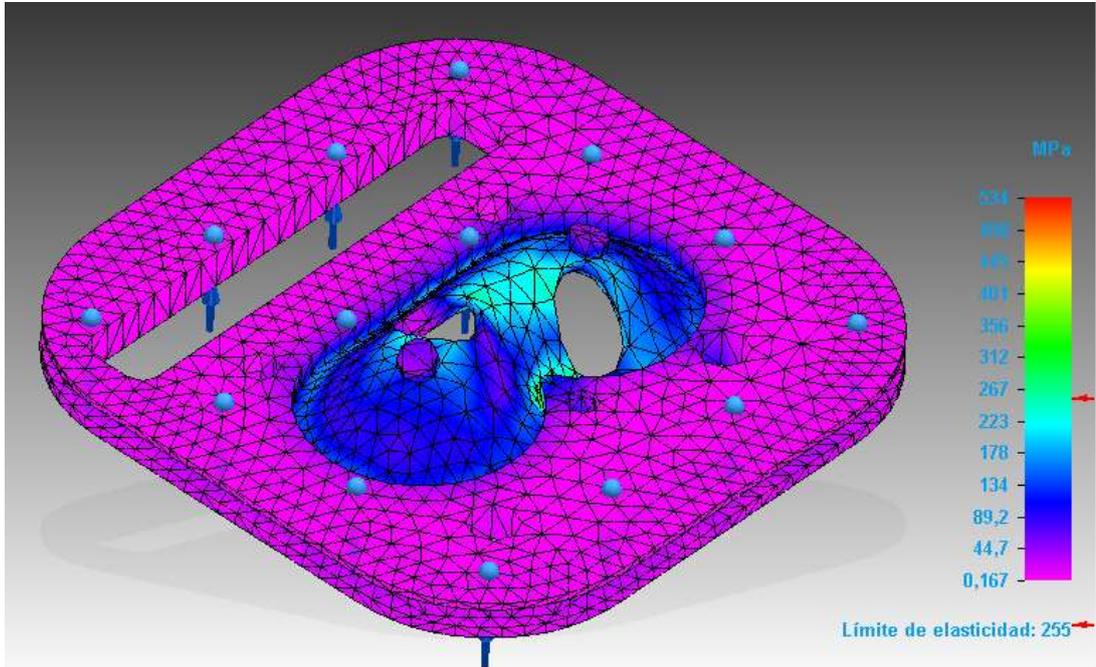


Figura 47. Simulación tensiones culatín.

En la siguiente imagen se observa la deformación que sufriría la pieza en el momento de maxima presion durante la combustion. La deformación que se observa visualmente en la imagen esta realizada a escala de forma que se pueda apreciar los puntos donde mas se deformaria la pieza. Si observamos la correspondencia entre los colores y las deformacion, vemos que la maxima deformacion es de 0,0015 mm lo cual no se podria apreciar con la vista.

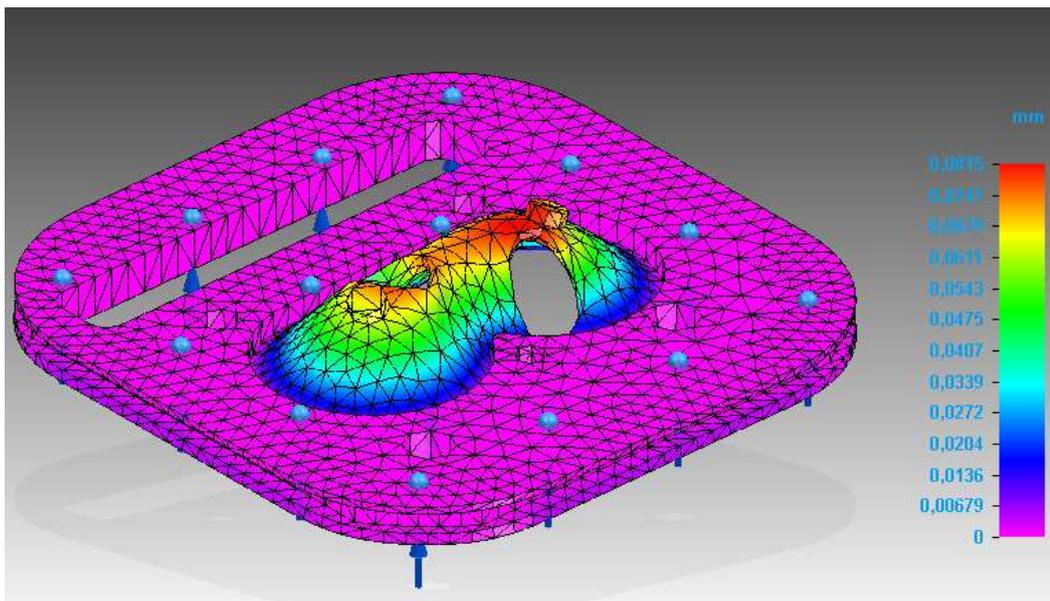


Figura 48. Simulación deformación culatín.

Analizando las dos imágenes se observa que la deformación máxima se produce en la zona de los orificios de las válvulas y es de 0,0015 mm ,y coincide con el punto de mayor tensión, es muy pequeña la deformación y no supondría ningún problema para el correcto funcionamiento del motor. Y en lo que se refiere a las tensiones, en algunos punto se acerca al límite elástico medio del material, por lo que se debería utilizar nitruro de silicio con un límite elástico superior, existe nitruro de silicio con limite elástico cercano a los 300 Mpa, y en el caso de querer un límite elástico superior se debería optar por mezclar el nitruro de silicio con otros elementos, aunque ,según los cálculos de la simulación, el coeficiente de seguridad es de 1,37 por lo que está por encima del límite de seguridad mínimo que es 1,2.

-Datos de la simulación de la válvula de admisión.

Sobre la válvula de admisión se ha realizado el mismo estudio que sobre el culatín, de forma que se ha estudiado las tensiones a las que será sometida y la deformación que sufrirá en cada punto. De esta forma se ha comprobado si el elemento soporta el funcionamiento y las fuerzas máximas durante la combustión.

Material	Nitruro de silicio	Coefficiente de Poisson	0,270
Densidad	3180 kg/m ³	Límite elástico	255 MPa
Coefficiente de expansión térmica	3,3 C ⁻¹	Tensión de rotura	255 MPa
Conductividad térmica	0,031 kW/m·C	% de elongación	0,085
Calor específico	840 J/kg·C	Carga aplicada	6265,57 KPa
Modulo de elasticidad	295000 MPa	Lugar aplicación carga	Parte inferior de la válvula de admisión

Tabla 22. Datos simulación de la válvula de admisión.

En cuanto a la Presión, se le ha aplicado la misma presión, que al culatín, en la parte inferior de la pieza, aunque las explosiones no afectan a toda la pieza, lo que no afecta al estudio. Hay que tener en cuenta que la deformación que se observa sobre los dientes de la periferia no es real, dado que estos no tienen contacto directo con la combustión.

Se observa en la imagen que ningún punto de la pieza sufre tensión próxima al límite elástico, por lo que no supondría ningún inconveniente la utilización de este material, incluso se podría utilizar nitruro de silicio con un límite de elasticidad inferior, si con esto consiguiéramos mejorar alguna característica del elemento o reducir costes. El punto más débil de la válvula son los dientes, los cuales realmente no recibirán la fuerza de la combustión por lo que no es necesario tenerlo en cuenta en este estudio. El coeficiente de seguridad mínimo de la pieza es de 4,28 por lo que supera ampliamente el mínimo.

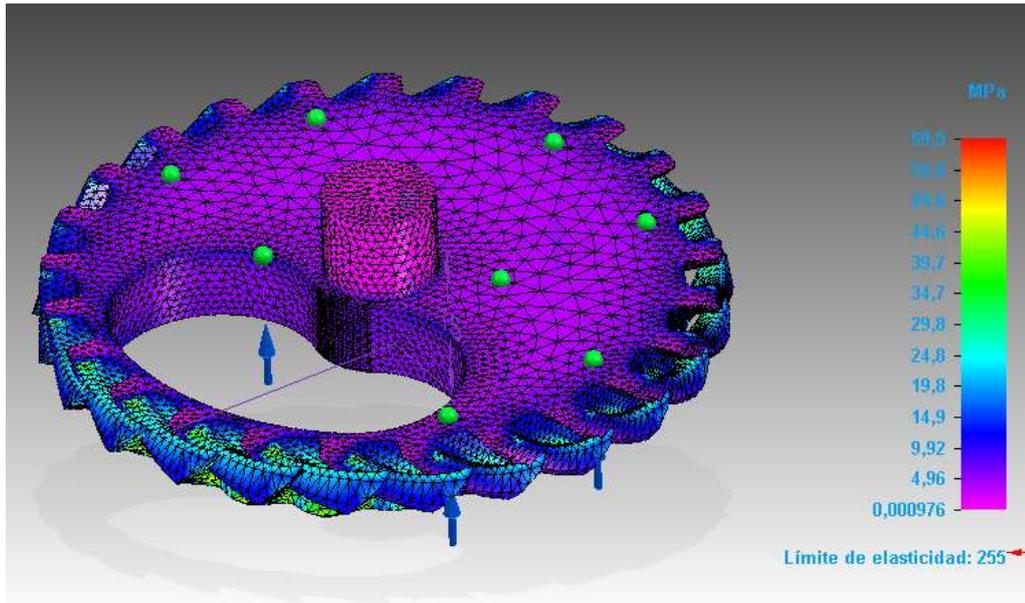


Figura 49. Simulación tensiones válvula admisión.

En la siguiente imagen se observan las deformaciones que recibe la válvula de admisión cuando es sometida a la presión máxima de la combustión. Observando la grafica se ve que la deformación máxima es de 0,0029 mm, pero esto se produciría sí los dientes de la periferia estuvieran en contacto con la combustión, pero no es así. La deformación máxima real que sufriría esta pieza es inferior a 0,0005 mm, lo que no influiría en el correcto funcionamiento del elemento.

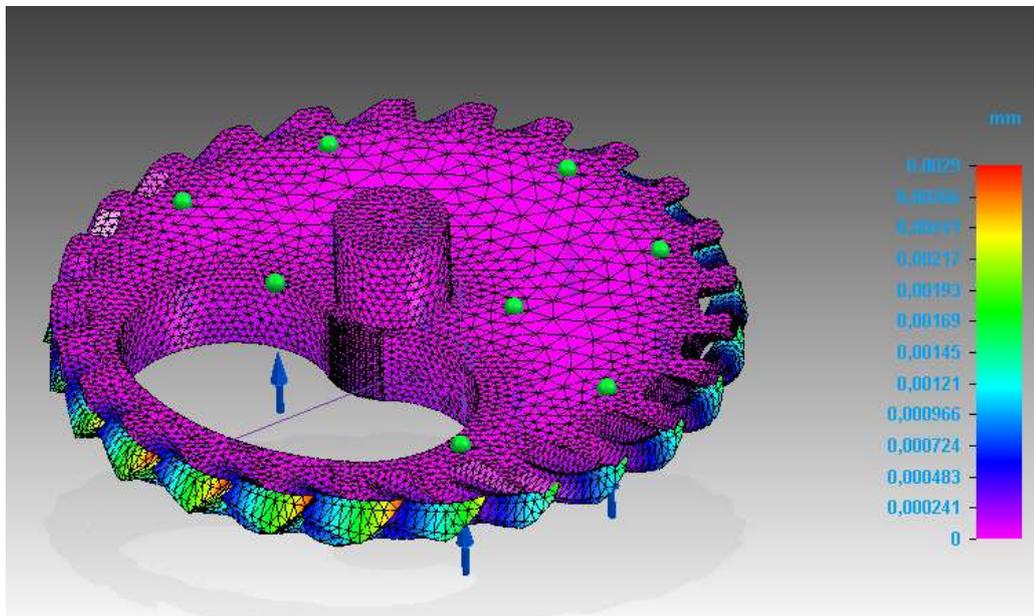


Figura 50. Simulación deformación válvula de admisión.

-Datos de la simulación de la válvula de escape.

Para el estudio de la válvula de escape se han utilizado los mismos parámetros que para la válvula de admisión, dado que trabajan en condiciones muy similares, aunque la válvula de escape, realmente, trabajara a temperatura superior debido a que los gases de escape salen al exterior a través de ella. Al igual que con la válvula de admisión las deformación y

tensiones que se observan sobre los dientes de la periferia, no serán reales durante el funcionamiento de éstas.

Material	Nitruro de silicio	Coefficiente de Poisson	0,270
Densidad	3180 kg/m ³	Límite elástico	255 MPa
Coefficiente de expansión térmica	3,3 C ⁻¹	Tensión de rotura	255 MPa
Conductividad térmica	0,031 kW/m·C	% de elongación	0,085
Calor específico	840 J/kg·C	Carga aplicada	6265,57 KPa
Modulo de elasticidad	295000 MPa	Lugar aplicación carga	Parte inferior de la válvula de escape

Tabla 23. Datos simulación de la válvula de escape.

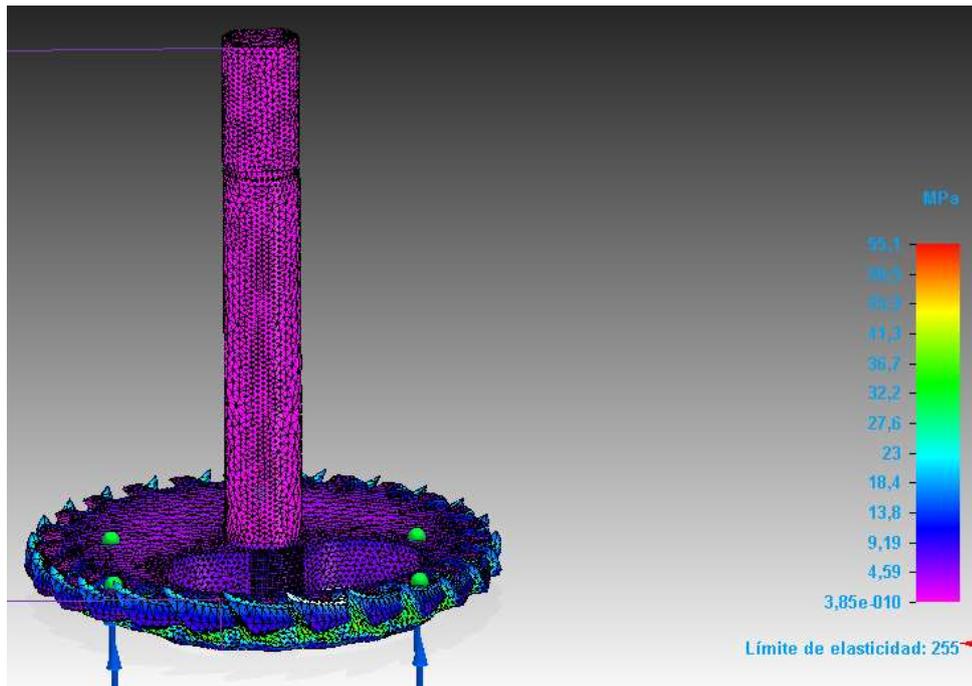


Figura 51. Simulación tensiones válvula de escape.

En la figura 51 se observa que la tensión máxima, que soportara la válvula de escape, no se aproxima al límite elástico, por lo que no supondría ningún problema para el correcto funcionamiento. Además analizando el resto de la simulación, observamos que el coeficiente de seguridad mínimo supera el mínimo, dado que es de 4,63.

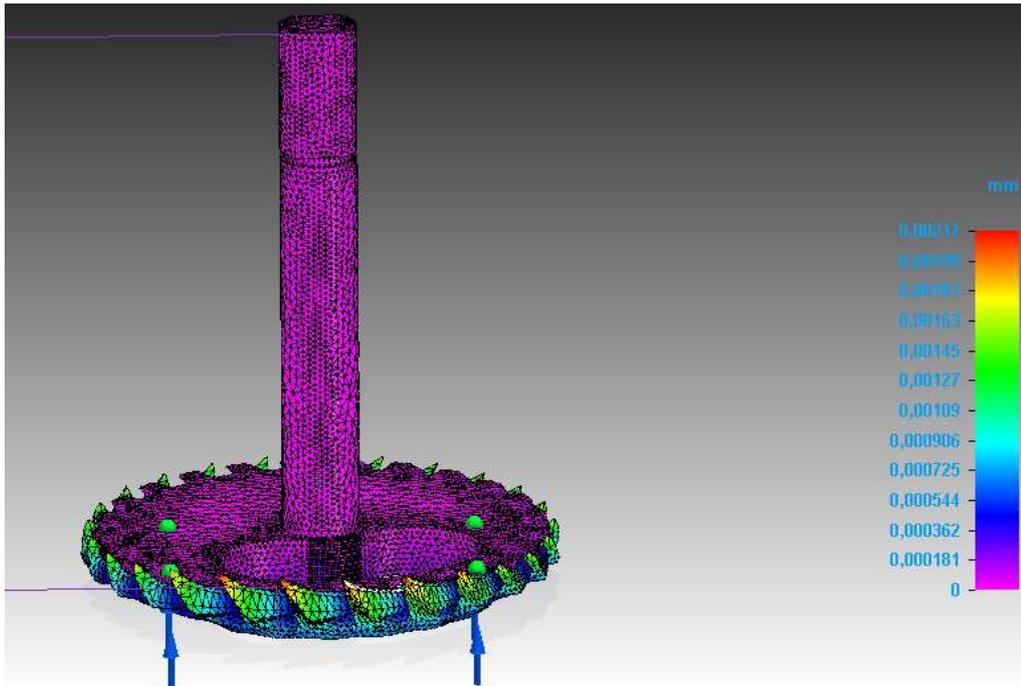


Figura 52. Simulación tensiones válvula de escape.

En cuanto a la deformación que se observa sobre la válvula de escape, es inferior a 0,0001 mm, por lo que no influiría sobre el funcionamiento del conjunto.

Después de analizar estas piezas se observa que el dimensionado y elección de materiales es acertada. También hay que tener en cuenta que estas piezas funcionan montadas juntas y el estudio se ha realizado pieza por pieza, por lo que en condiciones de funcionamiento real, al estar todas en contacto y en contacto con la culata, las deformaciones y tensiones sufridas serían inferiores a las observadas en el estudio.

Fuerzas soportadas por los engranajes.

Cada engranaje soporta la fuerza de la transmisión de movimiento, lo que se ha estudiado para asegurar que los elementos diseñados soportan las fuerzas que van a recibir durante su funcionamiento. Para este estudio se han calculado las fuerzas que soportara cada elemento y seguidamente con la ayuda de una simulación de fuerzas con el programa de diseño 3D Solid Works se ha verificado que cada elemento soporta el funcionamiento para el que ha sido diseñado.

Cada engranaje soporta dos fuerzas a consecuencia de la transmisión de movimiento. Estas fuerzas se descomponen del esfuerzo que se transmite perpendicular a la zona de contacto (F_{bt}). Las dos fuerzas que lo componen son perpendiculares, una en dirección radial del diente (F_n) que se tiene en cuenta para el cálculo del eje, y la fuerza tangencial al engranaje (F_t) que es la que se tiene en cuenta para el cálculo a flexión del diente. Con las siguientes formulas se ha obtenido las fuerzas que soporta cada elemento de la transmisión de movimiento, en la cual el radio primitivo se representa como "r", el par como "T" y " α " es el ángulo depresión del engranaje.

$$F_t = \frac{T}{r}$$
$$F_n = F_t * tg(\alpha)$$

En la tabla 24 se exponen los datos obtenidos para cada elemento al aplicar las anteriores formulas. El par que se ha considerado es el máximo que produce el motor, este dato está expuesto en el apartado de Cálculos.

Elemento	Radio primitivo (mm)	Par (Nm)	F _t (N)	F _n (N)
Piñón superior	20	18,5	925	336,67
Engranaje helicoidal + eje	11	18,5	1681,82	612,13
Engranaje helicoidal válvula de escape	24,5	37	1510,20	549,67
Válvula de escape	29	37	1275,86	464,38
Válvula de admisión	29	37	1275,86	464,38

Tabla 24. Cálculo fuerzas de los engranajes.

-Piñón superior.

Para la verificación de este elemento, se ha aplicado una fuerza sobre uno de los dientes del piñón. Este elemento recibe el movimiento a través de una cadena con la que tiene 8 dientes en contacto continuo, por lo la fuerza se reparte entre estos 8 puntos de apoyo. Esta fuerza es de 925 N, que repartida es de 115,625 N en cada diente. El estudio se ha realizado sobre un único diente, pero el efecto sería igual en todos los dientes en contacto con cadena. En la tabla 25 se exponen los datos utilizados para la simulación. El coeficiente de seguridad mínimo de la pieza es de 56,7 por lo que esta pieza soportaría su función e incluso podría reducirse en tamaño y variar el material utilizado.

Material	Acero ordinario de contenido intermedio en carbono	Coeficiente de Poisson	0,295
Densidad	7850 kg/m ³	Límite elástico	550 MPa
Coeficiente de expansión térmica	12 C ⁻¹	Tensión de rotura	1120 MPa
Conductividad térmica	0,05 kW/m·C	% de elongación	11,5
Calor específico	460 J/kg·C	Carga aplicada	115,625 N
Modulo de elasticidad	250000 MPa	Lugar aplicación carga	Diente del piñón

Tabla 25. Datos simulación del piñón superior.

En la figura 53 se observa el reparto de tensiones en la pieza al aplicar la fuerza tangencial sobre uno de los dientes. Se puede ver que la tensión más elevada que se produce, no llega a los 9 MPa y el límite elástico de este material es de 550 MPa, por lo que no existe ningún problema para la transmisión del movimiento con este dimensionado y elección de material.

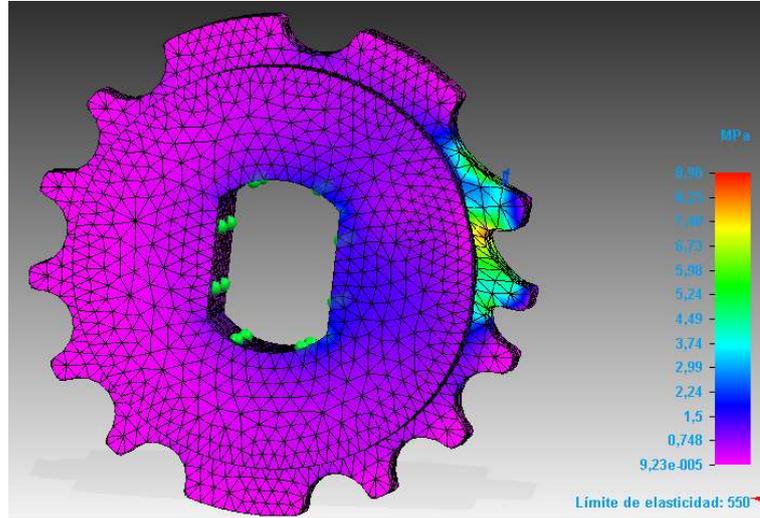


Figura 53. Simulación de tensiones en piñón superior.

En cuanto a lo que respecta a la deformación de la pieza al aplicarle dicha fuerza, en la figura 54 se observa de forma ampliada las deformaciones que sufre el piñón superior al aplicarle la fuerza. La deformación máxima es de 0,000307 mm lo que es una deformación despreciable y no causaría ningún problema para un correcto funcionamiento del sistema.

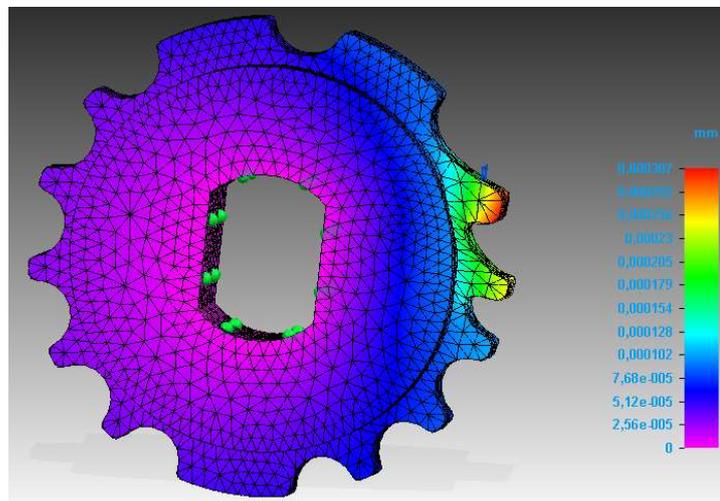


Figura 54. Simulación de deformación en piñón superior.

- Engranaje helicoidal + eje

En este caso se tiene en cuenta tanto las fuerzas tangenciales, que afectan a los dientes del engranaje, como las fuerzas que afectan al eje. En cuanto a las fuerzas que afectan al eje, se ha tenido en cuenta las fuerzas que afectan al engranaje de la pieza y las que afectan al piñón superior, dado que este va montado sobre el eje de la pieza estudiada. En la tabla 26 se han introducido los datos utilizados para las simulaciones.

Material	Acero ordinario de contenido intermedio en carbono	Límite elástico	550 MPa
Densidad	7850 kg/m ³	Tensión de rotura	1120 MPa
Coefficiente de expansión térmica	12 C ⁻¹	% de elongación	11,5
Conductividad térmica	0,05 kW/m·C	Carga tangencial aplicada	840,91 N
Calor específico	460 J/kg·C	Lugar aplicación carga	Diente del engraneje
Modulo de elasticidad	250000 MPa	Carga normal aplicada	336,67 N+ 612,13 N
Coefficiente de Poisson	0,295	Lugar de aplicación	Extremos del eje

Tabla 26. Datos simulación del engranaje helicoidal + eje.

En primer lugar se ha estudiado el efecto de las fuerzas tangenciales sobre los dientes del engranaje, en la figura 55 se observa el reparto de tensiones al aplicar una fuerza de 1681,82 N al engranaje, en este caso al haber siempre en contacto dos dientes, esta fuerza se reparte. En este caso se observa que la tensión más elevada que sufre el elemento, es de 436 MPa y el límite elástico es de 550 MPa, por lo que hay un margen para el correcto funcionamiento del sistema.

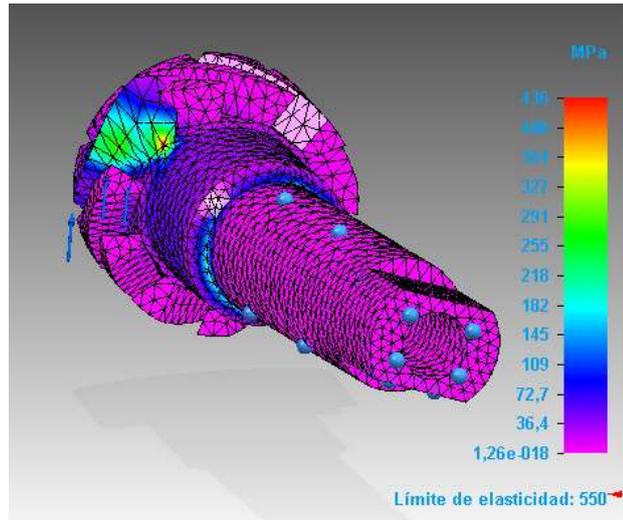


Figura 55. Simulación de tensiones sobre engranaje helicoidal.

En la figura 56 se representan las deformaciones que sufriría el engranaje al transmitir el máximo par que puede generar el motor. Se ve que la deformación máxima, que sufriría el elemento, sería de 0,0303 mm lo que no tendría que provocar ningún problema para su correcto funcionamiento. El coeficiente de seguridad que presenta este elemento es de 1,3 lo cual resulta un poco bajo comparado con otras piezas del sistema, pero la falta de espacio provoca que no se puede incrementar el tamaño del elemento, se podría variar el material, pero dado que supera el coeficiente mínimo, se mantienen las características.

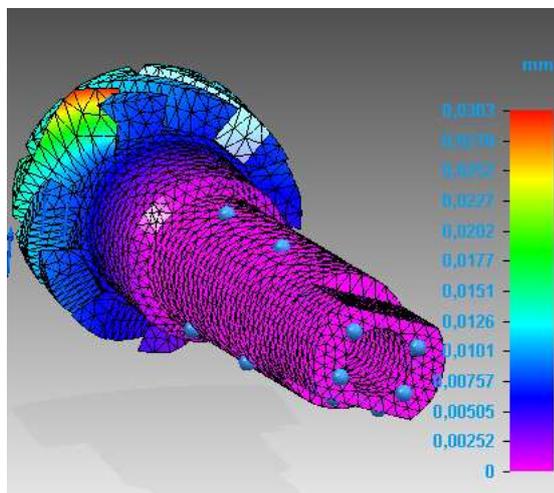


Figura 56. Simulación de deformaciones sobre engranaje helicoidal.

En cuanto al estudio de las fuerzas que afectan al eje, se ha aplicado las fuerzas que sufriría de parte del engranaje helicoidal y de parte del piñón superior, que va montado sobre éste. Al aplicar las fuerzas se observan que estas provocarían una flexión del eje. En la simulación con el programa de diseño 3D se observa la magnitud de esta deformación. El coeficiente de seguridad para las simulación con fuerzas sobre el eje es de 3,61 por lo que supera el coeficiente mínimo.

En primer lugar, figura 57, se observa el reparto de tensiones sobre las pieza, al aplicar las dos fuerzas y estableciendo el apoyo en la zona donde se apoya el elemento sobre los rodamientos. La tensión máxima que se produciría, sería de 152 MPa. Tensión que es muy inferior al límite elástico.

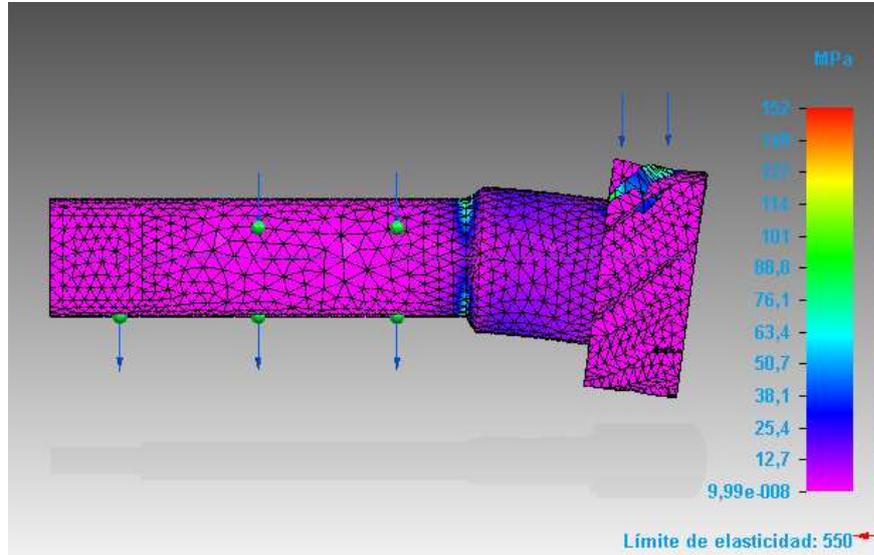


Figura 57. Reparto tensiones del eje.

En la figura 58 se representan las deformaciones que sufriría el eje durante la transmisión del máximo par del motor. Como se observa en la grafica, la deformación máxima sería de 0,0122 mm la que es una deformación que ni afectaría a la transmisión de movimiento. Ni provocaría un agarrotamiento de a pieza, dado que los rodamientos absorberían esta deformación con las holguras de montaje que presentan como margen de seguridad.

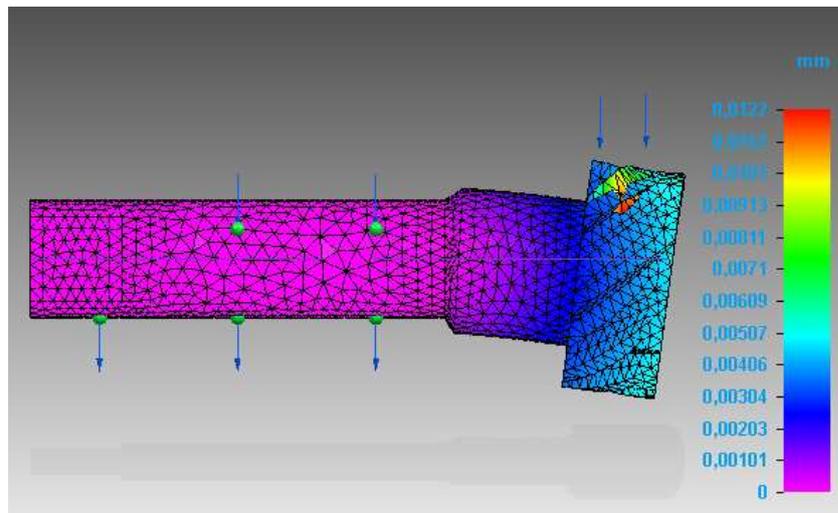


Figura 58. Deformaciones eje.

- Engranaje helicoidal válvula de escape.

Para la verificación de esta pieza se ha realizado una simulación aplicándole la fuerza tangencial correspondiente al par que transmite la pieza, dado que este elemento es uno de los encargados de reducir la velocidad, el par aumenta en la misma medida que reduce la velocidad, por lo que las fuerzas que soporta son mayores a los elementos anteriores. En la siguiente tabla se exponen los datos introducidos para la simulación.

Material	Acero ordinario de contenido intermedio en carbono	Coefficiente de Poisson	0,295
Densidad	7850 kg/m ³	Límite elástico	550 MPa
Coefficiente de expansión térmica	12 C ⁻¹	Tensión de rotura	1120 MPa
Conductividad térmica	0,05 kW/m·C	% de elongación	11,5
Calor específico	460 J/kg·C	Carga aplicada	755,1 N
Modulo de elasticidad	250000 MPa	Lugar aplicación carga	Diente del engranaje

Tabla 27. Datos simulación del engranaje helicoidal válvula de escape.

En lo que se refiere al reparto de tensiones, en la figura 59 se aprecia que la tensión máxima que soportaría algún punto de la pieza (color rojo en la figura) es de 338 MPa, cuando el límite elástico es de 550 MPa, por lo que no produciría daños a la pieza. El coeficiente de seguridad mínimo que presenta la pieza es de 1,63, que es el que se presenta en el punto más crítico, que es la base de los dientes de los engranajes.

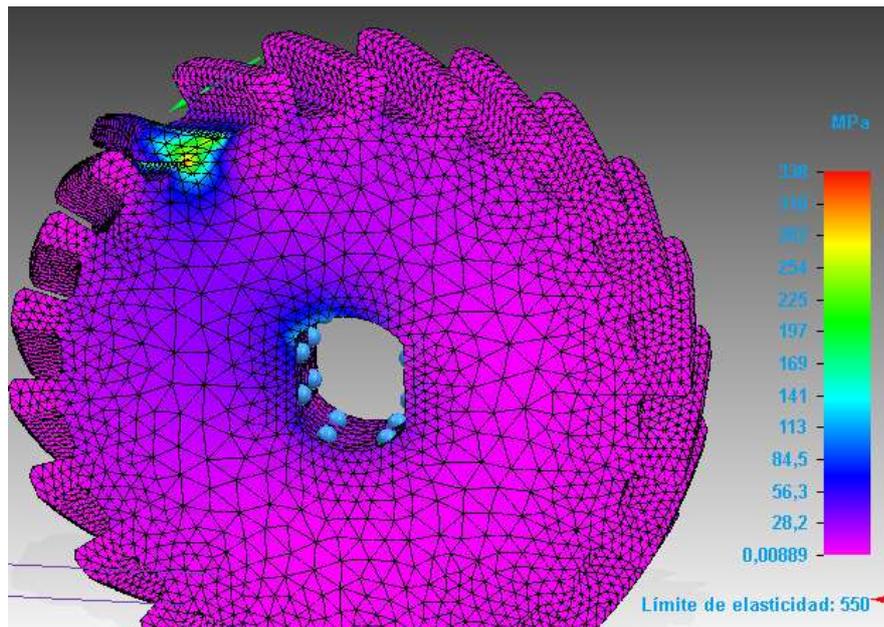


Figura 59. Simulación de tensiones de engranaje helicoidal.

Al transmitir el movimiento la pieza se deforma debido a las fuerzas que transmite, en la figura 60 se observa las deformaciones que sufría el elemento durante la transmisión del máximo par. Como indica la grafica, la deformación máxima sería de 0,0234 mm lo que no sería un inconveniente para el correcto desempeño de la función de esta pieza.

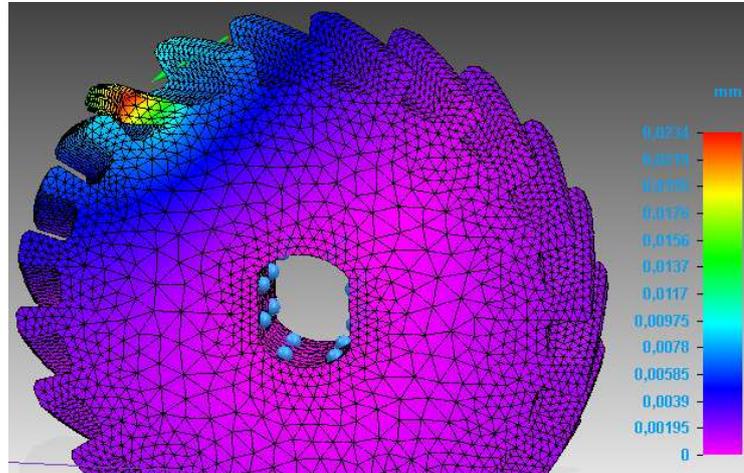


Figura 60. Gráfica de deformaciones del engranaje.

- Válvula de escape.

En lo que respecta al estudio de este elemento, hay que tener en cuenta tanto el hecho de que tiene una parte de engranaje, como el tema que parte de la pieza es un eje sobre el cual se monta otro engranaje. Por lo que hay que realizar tanto el estudio de cómo afecta, la transmisión de movimiento, del engranaje. Y realizar el estudio de cómo afecta la transmisión de movimiento de los dos engranajes al eje que los une. Los datos utilizados para este estudio están expuestos en la tabla 28.

Material	Nitruro de silicio	Límite elástico	255 MPa
Densidad	3180 kg/m ³	Tensión de rotura	255 MPa
Coefficiente de expansión térmica	3,3 C ⁻¹	% de elongación	0,085
Conductividad térmica	0,031 kW/m·C	Carga tangencial aplicada	637,93 N
Calor específico	840 J/kg·C	Lugar aplicación carga	Diente del engranaje
Modulo de elasticidad	295000 MPa	Carga normal aplicada	464,38 N + 549,67 N
Coefficiente de Poisson	0,270	Lugar de aplicación	Extremos del eje

Tabla 28. Datos simulación de la válvula de escape.

En primer lugar se realiza el estudio de la transmisión de movimiento por parte del engranaje, al aplicar la fuerza tangencial que transmite esta pieza se puede observar el reparto de tensiones, figura 61, que sufre el elemento. El valor máximo es de 173 MPa el cual es inferior al límite elástico del material de la pieza, que es de 255 Mpa. En lo que respecta al coeficiente de seguridad es de 1,47 para la simulación en la que se aplica la fuerza tangencia.

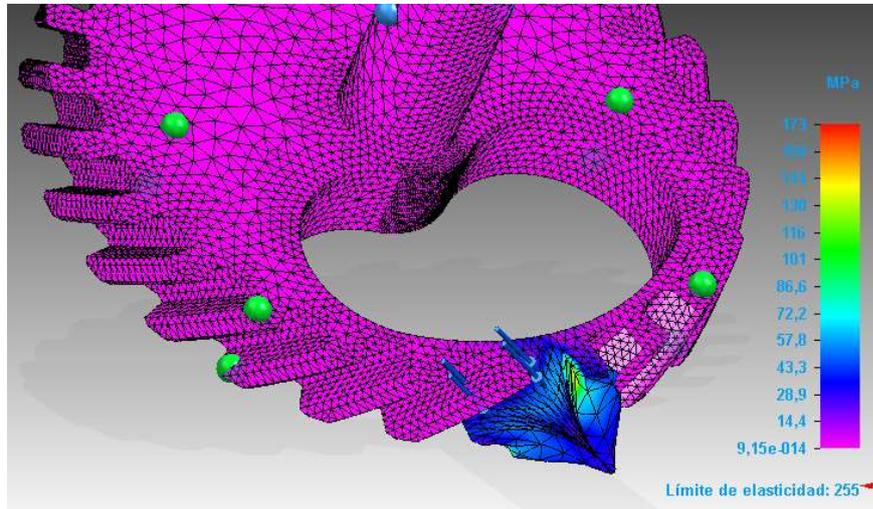


Figura 61. Simulación de reparto de tensiones.

En lo que respecta a las deformaciones que sufriría este elemento, en la figura 62 se representa como afecta la transmisión de movimiento a la forma de la pieza. En la imagen la deformación esta ampliada para que se observe con claridad, pero realmente la deformación máxima que sufriría el elemento sería de 0,00145 mm.

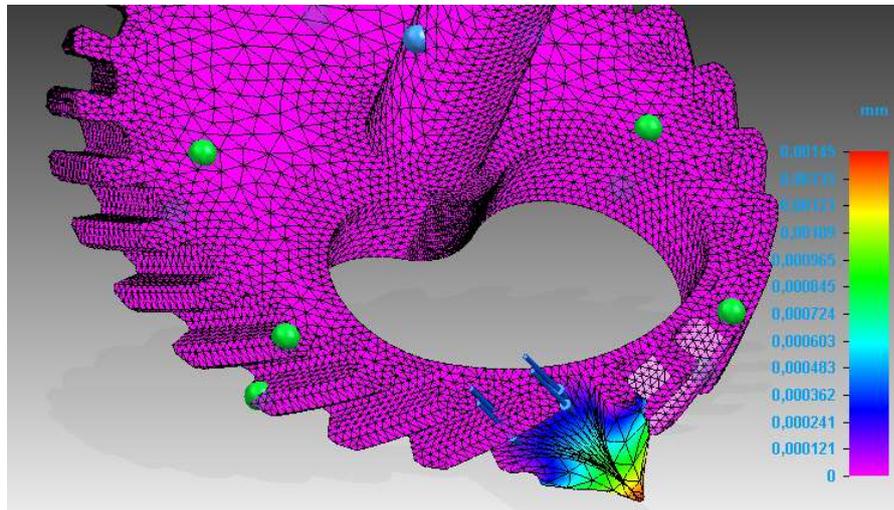


Figura 62. Representación deformaciones.

La otra parte del estudio de la válvula de escape es la de los esfuerzos que sufre el eje que conforma la pieza. Para esto se realiza la simulación aplicando las fuerzas que le generan los dos engranajes, el que forma parte de la pieza y el que se monta en el otro extremo, y se considera que la pieza tiene el desplazamiento restringido dado que va montada en la culata, solo se le permite el movimiento de giro.

En la figura 63 se observa el reparto de tensiones que se genera en la pieza. El punto que más sufre es donde está la acanaladura donde se monta un circlip para evitar el desplazamiento del engranaje. Al observar la grafica se ve que la tensión más alta que sufre el elemento, en este punto, es de 116 MPa. Lo cual es inferior al límite elástico de la pieza, por lo que no provocaría daños a la pieza. El coeficiente de seguridad mínimo es de 2,21 por lo que la pieza cumpliría con el requisito de tener un coeficiente superior a 1,2.

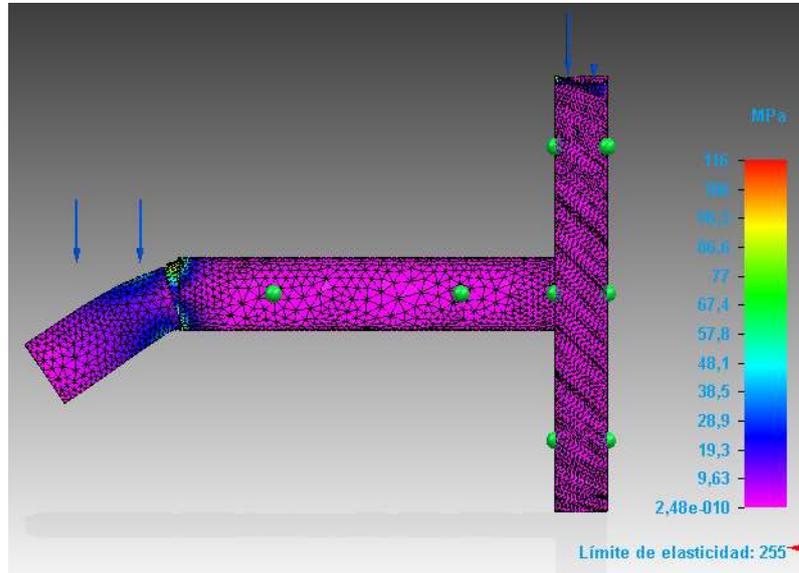


Figura 63. Simulación de reparto de tensiones.

Estas tensiones a su vez provocan deformaciones en la pieza, las cuales se pueden observar en la figura 64. La parte de la pieza que más se desplaza es la punta sobre la que va montado el engranaje helicoidal, dado que va en voladizo y el punto más débil de la pieza está cerca de este punto. Con todos los elementos montados, esta deformación sería menor. Analizando los datos, vemos que la deformación máxima es de 0,00704 mm, lo que es una deformación pequeña y que no afectaría al funcionamiento del sistema.

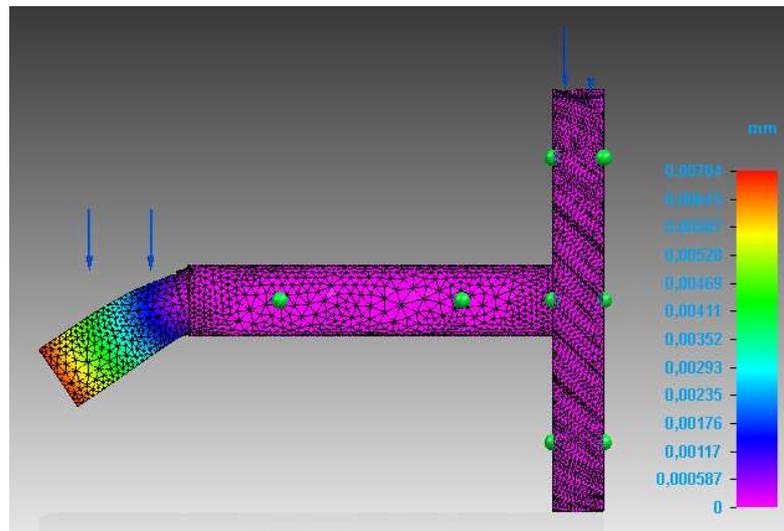


Figura 64. Deformaciones del eje.

- Válvula de admisión.

En lo que respecta a esta pieza, se considera como un engranaje, tiene mecanizado un pequeño eje el cual se ha despreciado para el estudio, debido a su pequeño tamaño y poca repercusión. En la tabla 29 se observan los datos utilizados para realizar la simulación.

Material	Nitruro de silicio	Coefficiente de Poisson	0,270
Densidad	3180 kg/m ³	Límite elástico	255 MPa
Coefficiente de expansión térmica	3,3 C ⁻¹	Tensión de rotura	255 MPa
Conductividad térmica	0,031 kW/m·C	% de elongación	0,085
Calor específico	840 J/kg·C	Carga aplicada	637,93 N
Modulo de elasticidad	295000 MPa	Lugar aplicación carga	Diente del engranaje

Tabla 29. Datos simulación de la válvula de admisión.

En lo que se refiere al estudio del reparto de tensiones, existe un punto en el que la tensión es de 221 MPa, tensión inferior al límite elástico del material. El coeficiente de seguridad mínimo que presenta este elemento es de 1,33.

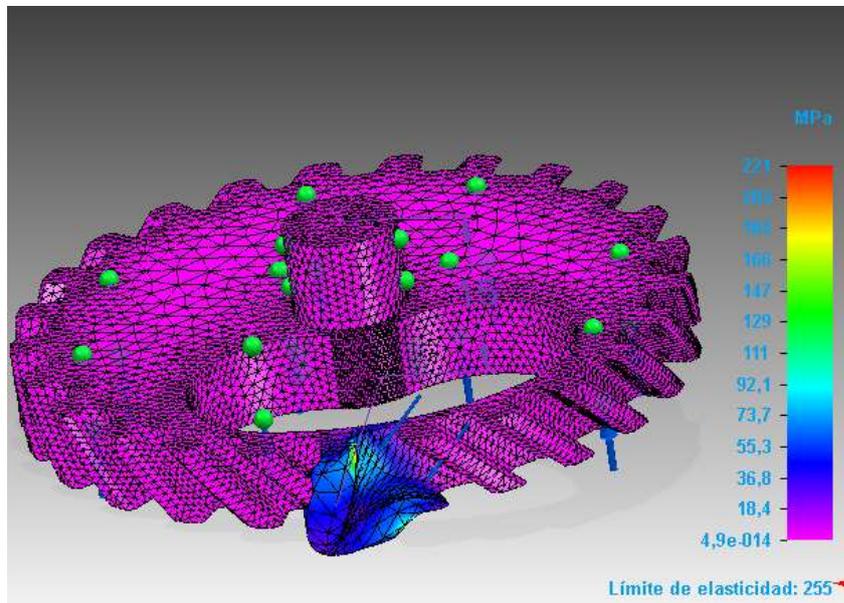


Figura 65. Estudio de tensiones en válvula de admisión.

En la figura 65 se observan las deformaciones que sufre la válvula de admisión durante la transmisión del máximo par. Como se puede ver en la grafica, la deformación máxima de la pieza se produciría en la punta del diente y sería de 0,00182 mm. Esta deformación es muy pequeña y no debería causar ningún tipo de problema.

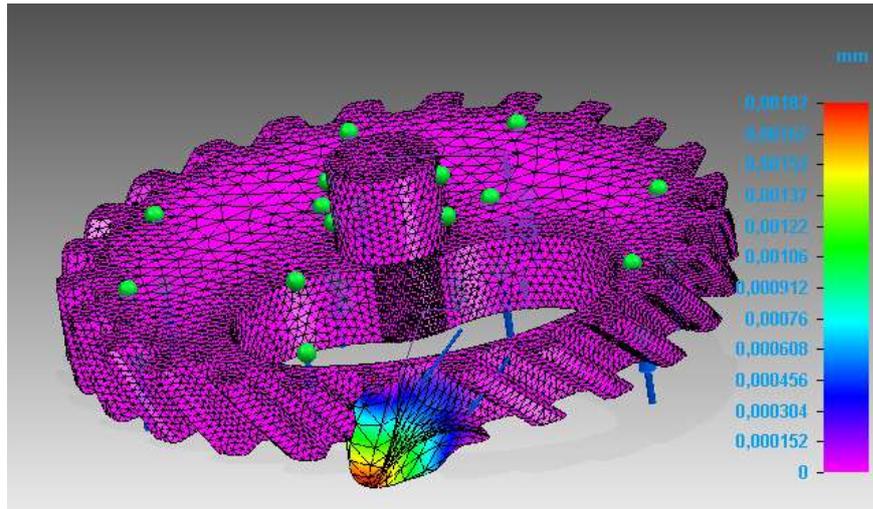


Figura 66. Simulación de deformaciones de la válvula.

- Resumen simulaciones.

En la tabla 30 se expone un resumen de los datos obtenidos en las simulaciones realizadas en este apartado, en esta tabla se reflejan los datos mas importantes obtenidos.

Elemento	Simulación	Tensión máx. (MPa)	Deformación máx. (μm)	Coefficiente de seguridad
Culatín	Combustión	186,1	1,5	1,37
Válvula de escape	Combustión	55,1	0,1	4,63
	F_t	173	1,45	1,47
	F_n	116	7,04	2,21
Válvula de admisión	Combustión	59,5	0,5	4,28
	F_t	221	1,82	1,33
Piñón superior	F_t	9	0,307	56,7
Engranaje helicoidal + eje	F_t	436	30,3	1,3
	F_n	152	12,2	3,61
Engranaje helicoidal válvula de escape	F_t	338	23,4	1,63

Tabla 30. Resumen datos de las simulaciones.

6.4. Proceso fabricación

En este apartado se procede a la selección del proceso de fabricación para cada elemento nuevo, para esto tenemos en cuenta el material seleccionado en el apartado anterior, la forma y complejidad de la pieza, el nivel de acabado necesario y las dimensiones y peso de la pieza. Aplicando estos parámetros al programa CES EDUPACK obtenemos diversos métodos para la fabricación de cada pieza, la decisión de cuál será el proceso más idóneo se determina comparando las características de cada proceso según las características del proceso que prioricemos, y principalmente se tiene en cuenta si con el proceso se puede realizar realmente la pieza y si después será necesario, o no, otro proceso para el acabado final del elemento.

Culatín:

A la hora de fabricar el culatín lo más importante es que el acabado de la cámara de las válvulas debe ser lo más fino posible, para reducir el rozamiento entre las válvulas de disco y el culatín. Además la parte que más problemas puede causar son los aletines en el caso de crear la pieza con un molde, pero se puede solucionar con otros métodos de fabricación o mecanizándolo posteriormente.

En las siguientes imágenes se observa la geometría de la pieza:

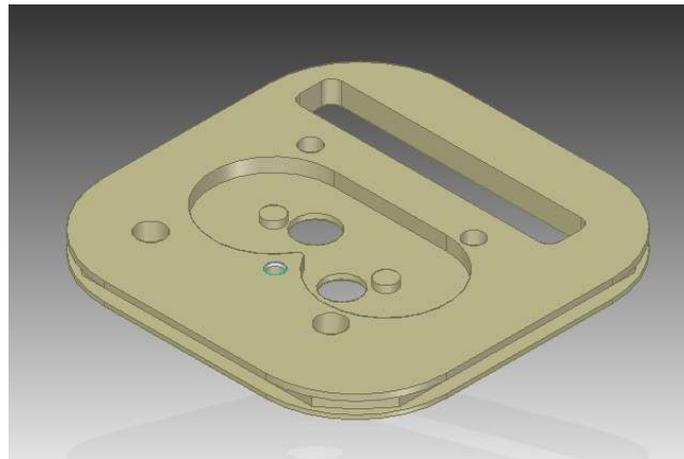


Figura 67. Culatín vista superior.

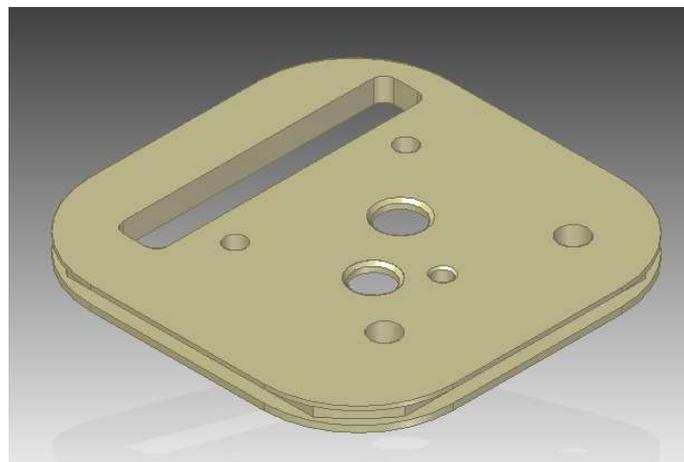


Figura 68. Culatín vista inferior.

Características de la pieza:

Dimensiones			Volumen (m ³)	Peso (g)	Complejidad	Material
Ancho (mm)	Largo (mm)	Alto (mm)				
172	170	11	2,058 · 10 ⁻⁴	580	Aletines	Nitruro de silicio

Tabla 31. Características del culatín.

Posibles procesos de fabricación:

Proceso	Acabado	Aprovechamiento material	Coste	Otros
Impresión con aglutinante	Malo	95%-100%	Bajo	Necesita añadirse material para rellenar poros
Mecanizado y cortado por chorro abrasivo	Muy bueno	Pérdida de material arrancado	Bajo	Redondeos en cortes profundos
Molienda	Muy bueno	Pérdida de material arrancado	Bajo	
Prensado y sinterizado	Bueno	90%-97%	Medio	
Sinterizado selectivo por laser	Malo	50 %-70 % (se puede reutilizar el sobrante)	Alto	Necesita añadirse material para rellenar poros

Tabla 32. Posibles procesos de fabricación del culatín.

Proceso de fabricación seleccionado:

Prensado y sinterizado: este proceso es un poco más caro que otros, pero con éste se obtiene la pieza con la geometría completamente acabada y sin porosidad. Lo único que es necesario rematar, es la cámara de las válvulas, lo cual con un proceso de molienda se mejora el acabado de esta zona. Además el proceso de prensado y sinterizado tiene un alto aprovechamiento del material.

Culata:

A la hora de fabricar la culata lo que hay que tener en cuenta principalmente es el acabado de la zona que está en contacto con las válvulas de disco que debe ser lo más fino posible, para reducir el rozamiento entre las válvulas de disco y la culata. Además la parte que más problemas puede causar son los conductos de admisión y escape, además de los aletines, en el caso de crear la pieza con un molde, pero se puede solucionar con otros métodos de fabricación o mecanizándolo posteriormente.

En las siguientes imágenes se observa la geometría de la pieza:

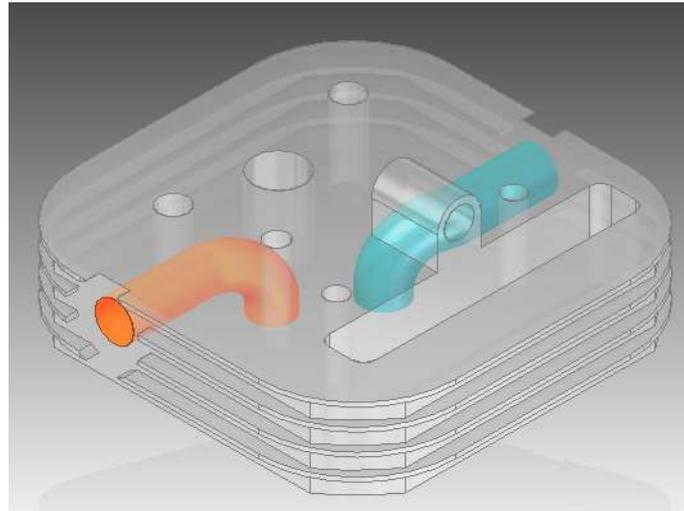


Figura 69. Culata vista superior.

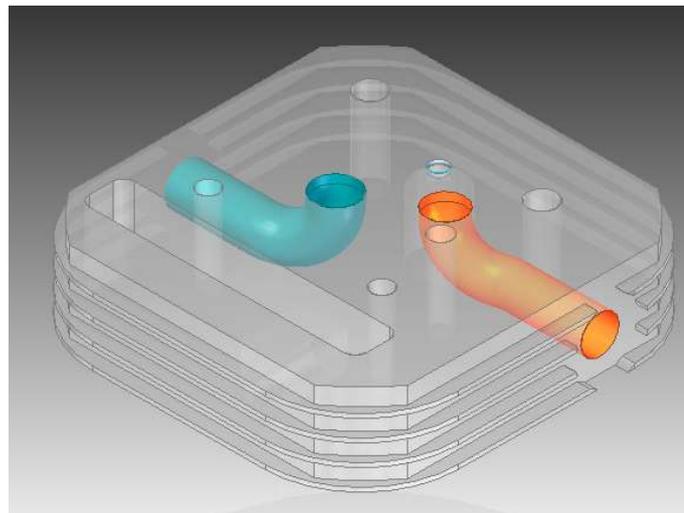


Figura 70. Culata vista inferior.

Características de la pieza:

Dimensiones			Volumen (m ³)	Peso (g)	Complejidad	Material
Ancho (mm)	Largo (mm)	Alto (mm)				
172	170	60	$8,208 \cdot 10^{-4}$	2330	Conductos escape y admisión. Aletines	Nitruro de silicio

Tabla 33. Características de la culata.

Posibles procesos de fabricación:

Proceso	Acabado	Aprovechamiento material	Coste	Otros
Impresión con aglutinante	Malo	95%-100%	Bajo	Necesita añadirse material para rellenar poros
Mecanizado y cortado por chorro abrasivo	Muy bueno	Pérdida de material arrancado	Bajo	Redondeos en cortes profundos
Molienda	Muy bueno	Pérdida de material arrancado	Bajo	
Prensado y sinterizado	Bueno	90%-97%	Medio	
Sinterizado selectivo por laser	Malo	50%-70% (se puede reutilizar el sobrante)	Alto	Necesita añadirse material para rellenar poros

Tabla 34. Posibles procesos de fabricación para la culata.

Proceso de fabricación seleccionado:

Impresión con aglutinante: Con este proceso se consigue la geométrica completa de la culata, conductos y aletines incluidos. Hay que tener en cuenta que con este proceso se consigue una pieza porosa, por lo que hay que añadir un material para rellenar los poros de la pieza, en este caso el material será el bronce, que además de ser el material más utilizado para este fin es un material con bajo coeficiente de fricción que es muy importante en algunas partes de este elemento. El problema está en que el acabado es malo, pero aplicando el proceso de molienda en algunas zonas como es la zona de contacto con las válvulas de disco, el hueco del eje de la válvula de escape y el plano de unión entre la culata y el culatín, de esta forma la culata queda acabada.

Válvula de disco de escape:

En cuanto a la fabricación de la válvula de disco de escape hay que tener en cuenta la zona que está en contacto con el culatín y con la culata dado que esta zona debe tener el mejor acabado posible para reducir el rozamiento entre estas piezas. La zona más complicada es el mecanizado de los dientes helicoidales de la parte exterior del disco, que según el proceso de fabricación tendrá más dificultad de realizarse o no, o tendrá que realizarse posteriormente.

En las siguientes imágenes se observa la geometría de la pieza:



Figura 71. Válvula de disco de escape vista superior.



Figura 72. Válvula de disco de escape vista inferior.

Características de la pieza:

Dimensiones			Volumen (m ³)	Peso (g)	Complejidad	Material
Ancho (mm)	Largo (mm)	Alto (mm)				
59	59	75,5	$1,746 \cdot 10^{-5}$	50	Dientes engranaje helicoidal	Nitruro de silicio

Tabla 35. Características de la válvula de disco de escape.

Posibles procesos de fabricación:

Proceso	Acabado	Aprovechamiento material	Coste
Moldeo por inyección de polvos	Bueno	80%-95%	Alto
Molienda	Muy bueno	Pérdida de material arrancado	Bajo
Prensado y sinterizado	Bueno	90%-97%	Medio

Tabla 36. Posibles procesos de fabricación para la válvula de disco de escape.

Proceso de fabricación seleccionado:

Prensado y sinterizado: este proceso es un poco más caro que otros, pero con éste se obtiene la pieza con la geometría completamente acabada y sin porosidad. El principal problema será en el momento de extraer la pieza de los moldes, que al mismo tiempo de separarse de la pieza, también deberá rotar debido a los dientes helicoidales. Dado que el acabado no es perfecto se deberá de aplicar un proceso de acabado por molienda, de forma que las zonas que van a estar sometidas a rozamiento tengan un acabado mucho mejor. Además el proceso de prensado y sinterizado tiene un alto aprovechamiento del material.

Válvula de disco de admisión:

Para la fabricación de la válvula de disco de admisión hay que tener en cuenta la zona que está en contacto con el culatín y con la culata dado que esta zona debe tener el mejor acabado posible para reducir el rozamiento entre estas piezas. La zona más complicada es el mecanizado de los dientes helicoidales de la parte exterior del disco, que según el proceso de fabricación tendrá más dificultad de realizarse o no, o tendrá que realizarse posteriormente.

En las siguientes imágenes se observa la geometría de la pieza:

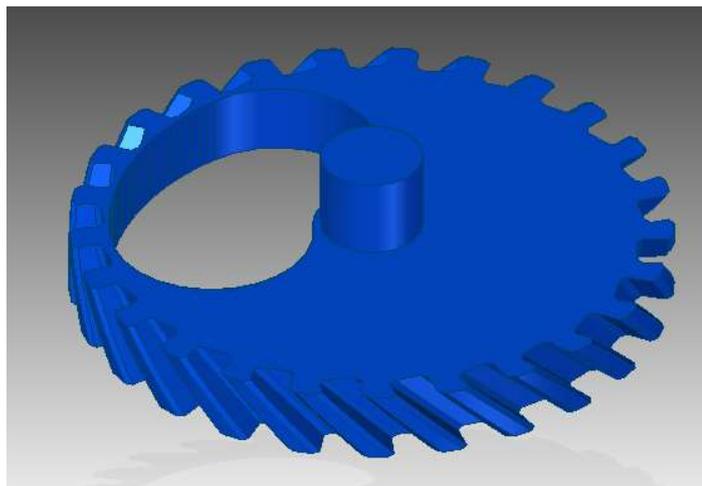


Figura 73. Válvula de disco de admisión vista superior.

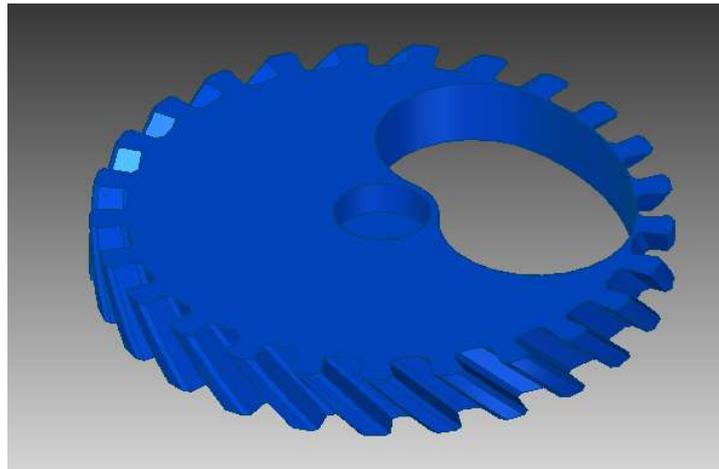


Figura 74. Válvula de disco de admisión vista inferior.

Características de la pieza:

Dimensiones			Volumen (m ³)	Peso (g)	Complejidad	Material
Ancho (mm)	Largo (mm)	Alto (mm)				
59	59	15	$1,253 \cdot 10^{-5}$	40	Dientes engranaje helicoidal	Nitruro de silicio

Tabla 37. Características de la válvula de disco de admisión.

Posibles procesos de fabricación:

Proceso	Acabado	Aprovechamiento material	Coste
Moldeo por inyección de polvos	Bueno	80%-95%	Alto
Molienda	Muy bueno	Pérdida de material arrancado	Bajo
Prensado y sinterizado	Bueno	90%-97%	Medio

Tabla 38. Posibles procesos de fabricación para la válvula de disco de admisión.

Proceso de fabricación seleccionado:

Prensado y sinterizado: este proceso es un poco más caro que otros, pero con éste se obtiene la pieza con la geometría completamente acabada y sin porosidad. El principal problema será en el momento de extraer la pieza de los moldes, que al mismo tiempo de separarse de la pieza, también deberá rotar debido a los dientes helicoidales. Dado que el acabado no es perfecto se deberá de aplicar un proceso de acabado por molienda, de forma que las zonas que van a estar sometidas a rozamiento tengan un acabado mucho mejor. Además el proceso de prensado y sinterizado tiene un alto aprovechamiento del material.

Engranaje helicoidal válvula de disco de escape:

En el momento de fabricar el engranaje helicoidal válvula de disco de escape hay que tener en cuenta principalmente la dificultad de generar los dientes helicoidales.

En las siguientes imágenes se observa la geometría de la pieza:

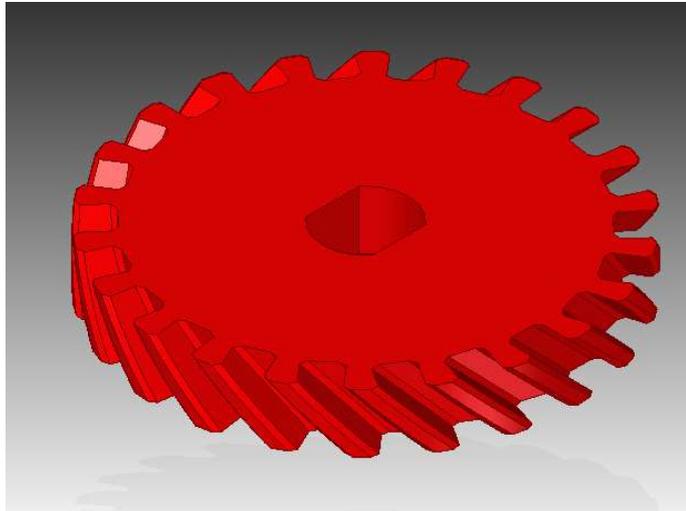


Figura 75. Engranaje helicoidal válvula de disco de escape.

Características de la pieza:

Dimensiones			Volumen (m ³)	Peso (g)	Complejidad	Material
Ancho (mm)	Largo (mm)	Alto (mm)				
50	50	7	$1,086 \cdot 10^{-5}$	90	Dientes engranaje helicoidal	Acero ordinario de contenido intermedio en carbono

Tabla 39. Características del engranaje helicoidal válvula de disco de escape.

Posibles procesos de fabricación:

Proceso	Acabado	Aprovechamiento material	Coste	Otros
Cepillado/perfilado/ranurado	Bueno	Pérdida de material arrancado	Bajo	
Consolidación ultrasónica	Malo	70%-80%	Alto	Se produce con laminas
Forja	Muy bueno	85%-95%	Medio	
Fundición a la cera perdida	Muy bueno	80%-85%	Bajo	Baja productividad

Tabla 40. Posibles procesos de fabricación para el engranaje helicoidal (1/2).

Proceso	Acabado	Aprovechamiento material	Coste	Otros
Fundición en molde de arena	Medio	60%-80%	Muy Bajo	
Fusión por haz de electrones	Medio	45%-55% (se reutiliza el sobrante)	Muy alto	
Mecanizado por electroerosión	Muy bueno	80%-95%	Medio	Muy lento
Fresado	Bueno	Pérdida de material arrancado	Medio	
Moldeo por inyección de polvos	Bueno	80%-95%	Alto	
Molienda	Muy bueno	Pérdida de material arrancado	Bajo	
Prensado y sinterizado	Bueno	90%-97%	Medio	
Torneado/taladrado/separado	Bueno	Pérdida de material arrancado	Medio	

Tabla 41. Posibles procesos de fabricación para el engranaje helicoidal (2/2).

Forja: Con el proceso de forja en caliente se obtiene la pieza acabada y con un acabado muy bueno. El único inconveniente en este caso es que la matriz debe rotar a la vez que se extrae la pieza de forma que salgan los dientes helicoidales.

Engranaje helicoidal + Eje:

En el momento de fabricar el engranaje helicoidal + eje hay que tener en cuenta principalmente la dificultad de generar los dientes helicoidales. Además de que el eje tiene que tener un buen acabado y resistencia. También hay que tener en cuenta que el eje va montado sobre unos rodamientos y el ajuste con estos debe ser perfecto para evitar que el eje se mueva durante el funcionamiento.

En la figura 56 se observa la geometría de la pieza:

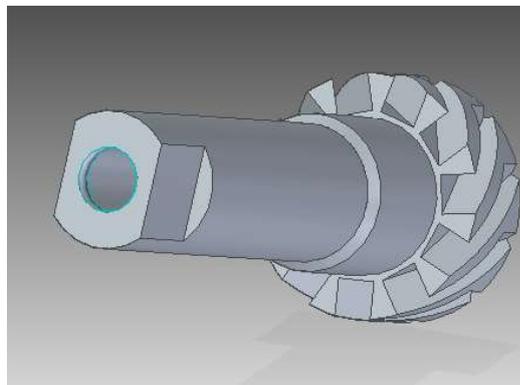


Figura 76. Engranaje helicoidal + Eje.

Características de la pieza:

Dimensiones			Volumen (m ³)	Peso (g)	Complejidad	Material
Ancho (mm)	Largo (mm)	Alto (mm)				
25	25	70	1,274 · 10 ⁻⁵	100	Dientes engranaje helicoidal	Acero ordinario de contenido intermedio en carbono

Tabla 42. Características del engranaje helicoidal + Eje.

Posibles procesos de fabricación:

Proceso	Acabado	Aprovechamiento material	Coste	Otros
Cepillado/perfilado/ranurado	Bueno	Pérdida de material arrancado	Bajo	
Consolidación ultrasónica	Malo	70%-80%	Alto	Se produce con laminas
Forja	Muy bueno	85%-95%	Medio	
Fundición a la cera perdida	Muy bueno	80%-85%	Bajo	Baja productividad
Fundición en molde de arena	Medio	60%-80%	Muy Bajo	
Fusión por haz de electrones	Medio	45%-55% (se reutiliza el sobrante)	Muy alto	
Mecanizado por electroerosión	Muy bueno	80%-95%	Medio	Muy lento
Fresado	Bueno	Pérdida de material arrancado	Medio	
Moldeo por inyección de polvos	Bueno	80%-95%	Alto	
Molienda	Muy bueno	Pérdida de material arrancado	Bajo	
Prensado y sinterizado	Bueno	90%-97%	Medio	
Torneado/taladrado/separado	Bueno	Pérdida de material arrancado	Medio	

Tabla 43. Posibles procesos de fabricación para el engranaje helicoidal + Eje.

Proceso de fabricación seleccionado:

Forja: Con el proceso de forja en caliente se obtiene la pieza acabada y con un acabado muy bueno. El único inconveniente en este caso es que la matriz debe rotar a la vez que se extrae la pieza de forma que salgan los dientes helicoidales.

Piñón superior:

En lo que respecta a la fabricación de esta pieza la forma es bastante sencilla, sin orificios internos ni formas complicadas, por lo que la selección del proceso de fabricación se determina por otros parámetros distintos a la geometría.

En la siguiente imagen se observa la geometría de la pieza:

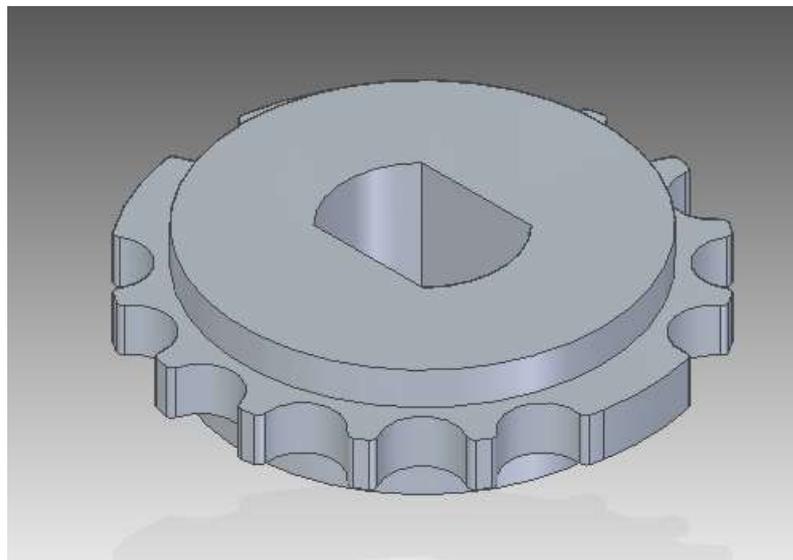


Figura 77. Piñón superior

Características de la pieza:

Dimensiones			Volumen (m ³)	Peso (g)	Complejidad	Material
Ancho (mm)	Largo (mm)	Alto (mm)				
41	41	10	$8,398 \cdot 10^{-6}$	70	Dientes piñón	Acero ordinario de contenido intermedio en carbono

Tabla 44. Características del piñón superior.

Posibles procesos de fabricación:

Proceso	Acabado	Aprovechamiento material	Coste	Otros
Cepillado/perfilado/ranurado	Bueno	Pérdida de material arrancado	Bajo	
Consolidación ultrasónica	Malo	70%-80%	Alto	Se produce con láminas
Forja	Muy bueno	85%-95%	Medio	
Fundición a la cera perdida	Muy bueno	80%-85%	Bajo	Baja productividad
Fundición en molde de arena	Medio	60%-80%	Muy Bajo	
Fusión por haz de electrones	Medio	45%-55% (se reutiliza el sobrante)	Muy alto	
Mecanizado por electroerosión	Muy bueno	80%-95%	Medio	Muy lento
Fresado	Bueno	Pérdida de material arrancado	Medio	
Moldeo por inyección de polvos	Bueno	80%-95%	Alto	
Molienda	Muy bueno	Pérdida de material arrancado	Bajo	
Prensado y sinterizado	Bueno	90%-97%	Medio	
Torneado/taladrado/separado	Bueno	Pérdida de material arrancado	Medio	

Tabla 45. Posibles procesos de fabricación para el piñón superior.

Proceso de fabricación seleccionado:

Forja: Con el proceso de forja se obtiene la pieza acabada y con un acabado muy bueno. Es un proceso rápido y con la geometría de esta pieza se plantean pocos problemas.

Rodamientos:

Los rodamientos están formados por distintas piezas: la pista exterior, la pista interior, elementos móviles (bolas, rodillos, agujas...) y la jaula de los elementos móviles. Cada elemento se fabrica por separado con un proceso distinto debido a su diferente geometría y función.

En la figura 58 se observa la geometría de varios tipos de rodamientos, extraída de www.rodamientosmonroy.com.



Figura 78. Tipos de rodamientos.

Características de la pieza:

Dimensiones			Volumen (m ³)	Peso (g)	Complejidad	Material
Ancho (mm)	Largo (mm)	Alto (mm)				
24	24	7	$1,979 \cdot 10^{-7}$	10	Varias piezas que fabricar y ensamblar	Acero ordinario de contenido alto en carbono

Tabla 46. Características de los rodamientos.

Posibles modelos de rodamientos:

En esta pieza se ha optado por utilizar elementos comerciales, ya que existen modelos comerciales de rodamiento que se adaptan a nuestras necesidades. En la tabla siguiente se exponen algunos modelos de rodamiento que se podrían utilizar en nuestro nuevo sistema de distribución por válvulas de discos rotativos.

Modelo	∅ interior	∅ exterior	Ancho	Precio	Tipo
61802-2RS	15	24	5	4,54	Bolas
FB 6802-2RS	15	24	5	6,20	Bolas
3802-2RS	15	24	7	4,51	2 filas bolas

Tabla 47. Posibles modelos de rodamientos.

Modelo de rodamiento seleccionado:

3802-2RS: este modelo además de cumplir las medidas necesarias para su montaje, en el nuevo sistema de distribución con válvulas de disco, está formado por dos filas de bolas lo que le da más resistencia a los esfuerzos, dado que reparte los esfuerzos sobre mas elementos (Bolas) y por lo tanto tiene más superficie de contacto.

Junta culatín-cilindro:

La junta culatín-cilindro está formado por tres partes, las cuales se fabrican por separado pero luego hay que unirlas, las laminas del núcleo y el aro de fuego están fabricadas en acero por lo que se pueden soldar las laminas al aro de fuego de forma que quede todo y el recubrimiento se puede pegar o adherir de alguna forma al núcleo. Las piezas en si no presentan gran dificultad geométrica dado que son chapas y no tienen formas complicadas ni orificios internos.

En la siguiente imagen se observa la geometría de la pieza:

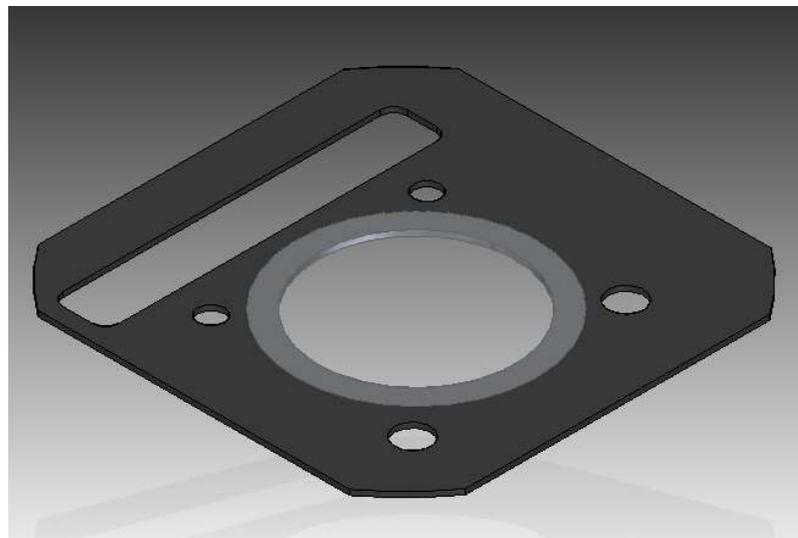


Figura 79. Junta culatín-cilindro.

Características de la pieza:

Parte	Dimensiones			Volumen (m ³)	Peso (g)	Material
	Ancho (mm)	Largo (mm)	Alto (mm)			
Aro	90	90	2	$1,037 \cdot 10^{-7}$	0,814	Acero contenido intermedio en carbono
Núcleo	160	158	1,5	$2,575 \cdot 10^{-5}$	39	Acero bajo contenido en carbono
Rec. Núcleo	160	158	0,5	$8,583 \cdot 10^{-6}$	10	Elastómero fluorado

Tabla 48. Características de las partes de la junta de culatín-cilindro.

Posibles procesos de fabricación:

Aro de fuego:

Proceso	Acabado	Aprovechamiento material	Coste
Corte por laser	Bueno	Pérdida de material cortado	Alto
Hoja de estampado, embutición y corte	Muy bueno	70%-80%	Medio
Fresado	Bueno	Pérdida de material arrancado	Medio

Tabla 49. Posibles procesos de fabricación del aro de fuego.

Núcleo:

Proceso	Acabado	Aprovechamiento material	Coste	Otros
Colado en cinta	Bueno	85%-90%	Medio	
Conformado de chapa	Muy bueno	85%-95%	Alto	
Corte por descarga eléctrica	Muy bueno	Pérdida de material cortado	Alto	
Hoja de estampado, embutición y corte	Muy bueno	70%-80%	Medio	
Mecanizado por electroerosión	Muy bueno	80%-95%	Medio	Muy lento
Mecanizado por chorro abrasivo	Muy bueno	Pérdida de material arrancado	Bajo	Redondeos en cortes profundos
Fresado	Bueno	Pérdida de material arrancado	Medio	
Moldes de cerámica 3D	Medio	40%-60%	Alto	Se crea molde cerámico
Sinterizado selectivo por laser	Malo	50%-70% (sobrante reutilizable)	Alto	Necesita rellenar poros

Tabla 50. Posibles procesos de fabricación del núcleo.

Recubrimiento núcleo:

Proceso	Acabado	Aprovechamiento material	Coste
Corte por laser	Bueno	Pérdida de material cortado	Alto
Fresado	Bueno	Pérdida de material arrancado	Medio
Moldeo por soplado	Muy bueno	50%-80%	Medio
Guillotinado y rasurado	Muy bueno	Pérdida de material cortado	Bajo

Tabla 51. Posibles procesos de fabricación del recubrimiento del núcleo.

Proceso seleccionado:

Aro de fuego y Núcleo: hoja de estampado, embutición y corte: con este proceso se obtiene la pieza completamente acabada y con un acabado muy bueno. Además es un proceso rápido.

Recubrimiento núcleo: guillotinado y rasurado: este proceso además de ser el más barato de los posibles, es rápido, deja la pieza totalmente acabada y con un muy buen acabado.

Para el montaje final de la junta, el aro de fuego y las laminas del núcleo se unen por soldadura, de esta forma quedan las laminas del núcleo unidas al aro y forman un cuerpo. El recubrimiento del núcleo se adhiere a éste por medio de un adhesivo rígido el cual se aplica por toda la parte exterior del núcleo, tanto por arriba como por abajo, y el elastómero fluorado se une al núcleo de forma que obtenemos la junta final.

Junta culatín-culata:

La junta culatín-culata está formado por dos partes, las cuales se fabrican por separado pero luego hay que unir las laminas del núcleo y el recubrimiento se puede pegar o adherir de alguna forma al núcleo. Las piezas en si no presentan gran dificultad geométrica dado que son chapas y no tienen formas complicadas ni orificios internos.

En la siguiente imagen se observa la geometría de la pieza:

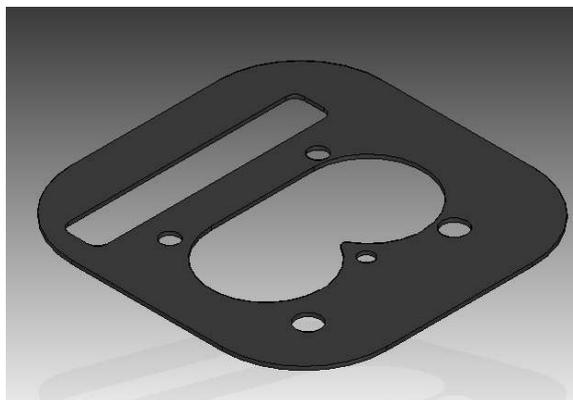


Figura 80. Junta culatín-culata.

Características de la pieza:

Parte	Dimensiones			Volumen (m ³)	Peso (g)	Material
	Ancho (mm)	Largo (mm)	Alto (mm)			
Núcleo	172	170	1,5	$2,761 \cdot 10^{-5}$	25	Acero bajo contenido en carbono
Rec. Núcleo	172	170	0,5	$9,202 \cdot 10^{-6}$	15	Elastómero fluorado

Tabla 52. Características de las partes de la junta de culatín-culata.

Posibles procesos de fabricación:

Núcleo:

Proceso	Acabado	Aprovechamiento material	Coste	Otros
Colado en cinta	Bueno	85%-90%	Medio	
Conformado de chapa	Muy bueno	85%-95%	Alto	
Corte por descarga eléctrica	Muy bueno	Pérdida de material cortado	Alto	
Hoja de estampado, embutición y corte	Muy bueno	70%-80%	Medio	
Mecanizado por electroerosión	Muy bueno	80%-95%	Medio	Muy lento
Mecanizado y cortado por chorro abrasivo	Muy bueno	Pérdida de material arrancado	Bajo	Redondeos en cortes profundos
Fresado	Bueno	Pérdida de material arrancado	Medio	
Prototipado de moldes de cerámica 3D	Medio	40%-60%	Alto	Primero se crea un molde cerámico
Sinterizado selectivo por laser	Malo	50%-70% (se reutiliza el sobrante)	Alto	Necesita añadirse material para rellenar poros

Tabla 53. Posibles procesos de fabricación del núcleo.

Recubrimiento núcleo:

Proceso	Acabado	Aprovechamiento material	Coste
Corte por laser	Bueno	Pérdida de material cortado	Alto
Fresado	Bueno	Pérdida de material arrancado	Medio
Moldeo por soplado	Muy bueno	50%-80%	Medio
Guillotinado y rasurado	Muy bueno	Pérdida de material cortado	Bajo

Tabla 54. Posibles procesos de fabricación del recubrimiento núcleo.

Proceso seleccionado:

Núcleo:

Hoja de estampado, embutición y corte: con este proceso se obtiene la pieza completamente acabada y con un acabado muy bueno. Además es un proceso rápido.

Recubrimiento núcleo:

Guillotinado y rasurado: este proceso además de ser el más barato de los posibles, es rápido, deja la pieza totalmente acabada y con un muy buen acabado.

Para el montaje final de la junta las láminas del núcleo se unen por soldadura por resistencia, para que estén todas unidas por algunos puntos, no por toda la superficie. El recubrimiento del núcleo se adhiere a éste por medio de un adhesivo rígido el cual se aplica por toda la parte exterior del núcleo, tanto por arriba como por abajo, y el elastómero fluorado se une al núcleo de forma que obtenemos la junta final.

Junta tapa culata:

Esta junta está formada de elastómero fluorado y presenta diversos troqueles, pero realmente la geometría es de lámina y no tiene grandes complicaciones como rebajes o formas complicadas para su fabricación.

En la siguiente imagen se observa la geometría de la pieza:

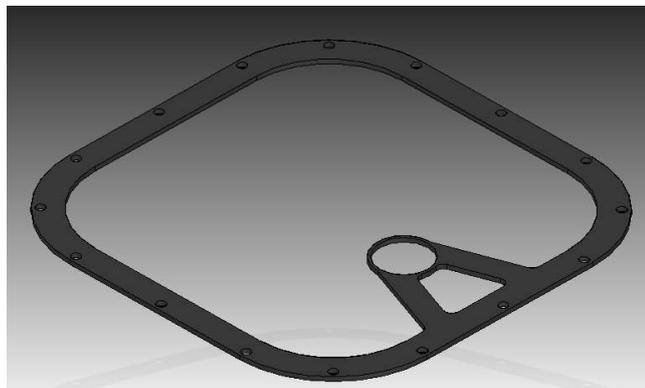


Figura 81. Junta tapa culata.

Características de la pieza:

Dimensiones			Volumen (m ³)	Peso (g)	Material
Ancho (mm)	Largo (mm)	Alto (mm)			
172	170	2	1,376 · 10 ⁻⁵	20	Elastómero fluorado

Tabla 55. Características de la junta tapa culata.

Posibles procesos de fabricación:

Proceso	Acabado	Aprovechamiento material	Coste
Corte por laser	Bueno	Pérdida de material cortado	Alto
Fresado	Bueno	Pérdida de material arrancado	Medio
Moldeo por soplado	Muy bueno	50%-80%	Medio
Guillotinado y rasurado	Muy bueno	Pérdida de material cortado	Bajo

Tabla 56. Posibles procesos de fabricación de la junta de la culata.

Proceso seleccionado:

Guillotinado y rasurado: este proceso además de ser el más barato de los posibles, es rápido, deja la pieza totalmente acabada y con un muy buen acabado.

Tornillos culata-cilindro (4 unidades):

En cuanto a la fabricación de los tornillos, la geometría no presenta complicaciones, exceptuando el roscado, él cual debe tener un buen acabado para que rosque perfectamente, sin ofrecer resistencia excesiva de forma que no falsee el par de apriete.

En la siguiente imagen se observa la geometría de la pieza:



Figura 82. Tornillos culata-cilindro.

Características de la pieza:

Dimensiones			Volumen (m ³)	Peso (g)	Complejidad	Material
Ancho (mm)	Largo (mm)	Alto (mm)				
20	20	163	$1,080 \cdot 10^{-5}$	90	Roscado	acero ordinario de contenido intermedio en carbono

Tabla 57. Características de los tornillos culata-cilindro.

Procesos de fabricación:

Para la fabricación de los tornillos se utilizan diversos procesos para el conformado, los cuales están expuestos en la siguiente tabla en el orden que se producen.

Proceso	Acabado	Aprovechamiento material	Coste
Trefilado	Bueno	98%-100%	Medio
Forja	Muy bueno	85%-95%	Alto
Forja de la rosca	Muy bueno	85%-95%	Alto

Tabla 58. Procesos de fabricación de los tornillos culata-cilindro.

Proceso:

Para la fabricación de un tornillo se parte de un hilo de acero, con las características que se desea, se le aplica un proceso de embutición donde se reduce el diámetro inicial para ajustarlo al deseado. Seguidamente por medio de forja se le da forma a la cabeza y el tamaño final del tornillo. Después por medio de un proceso de forja con unos filetes por los que rueda el tornillo, sometido a una gran fuerza, se crea la rosca. Finalmente según la dureza que se desee para el tornillo, se aplican algunos tratamientos para incrementar su dureza.

Tapa culata:

La tapa de la culata es un sólido hueco y presenta una protrusión para el montaje de la bujía, esto es lo que más puede condicionar el proceso de fabricación, aunque al tener una forma sencilla tampoco influye mucho en la elección del proceso. En las siguientes imágenes se observa la geometría de la pieza:

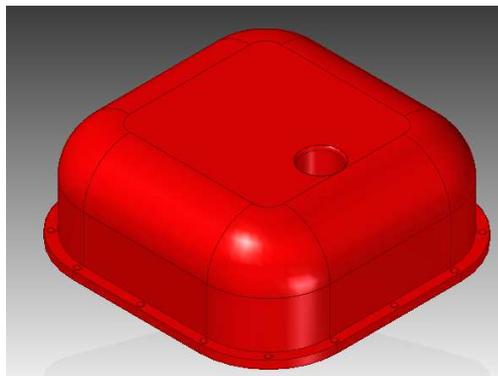


Figura 83. Tapa culata vista superior.

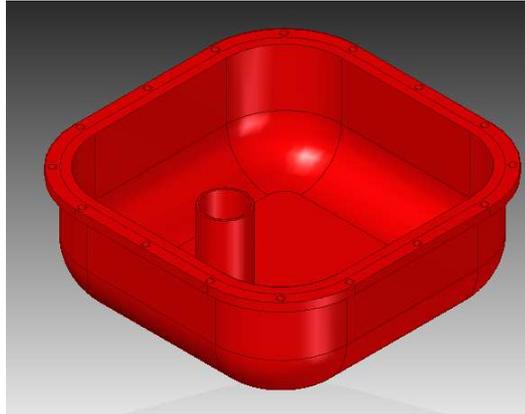


Figura 84. Tapa culata vista inferior.

Características de la pieza:

Dimensiones			Volumen (m ³)	Peso (g)	Complejidad	Material
Ancho (mm)	Largo (mm)	Alto (mm)				
172	170	45	$2,134 \cdot 10^{-4}$	320	Hueco bujía	Mezcla de poliéster + PC

Tabla 59. Características de la tapa culata.

Posibles procesos de fabricación:

Proceso	Acabado	Aprovechamiento material	Coste
Fresado	Bueno	Pérdida de material arrancado	Medio
Moldeo BMC(DMC)	Muy bueno	80%-95%	Medio
Pultrusión	Muy bueno	85%-97%	Medio

Tabla 60. Posibles procesos de fabricación de la tapa de la culata.

Proceso seleccionado:

Moldeo BMC (DMC): para fabricar la tapa de la culata fabricada en composite es el proceso más adecuado debido a que permite generar, directamente y de forma rápida, la pieza y además con un muy buen acabado, y aprovechando mayor cantidad de material.

Pistón:

En la fabricación del pistón el principal inconveniente es que precisa de un acabado muy bueno para asegurar su ajuste con el cilindro, así como el montaje y funcionamiento de los segmentos y el bulón de la biela. Lo que es la forma en general, sin acanaladuras y hueco, es bastante sencilla.

En las siguientes imágenes se observa la geometría de la pieza:



Figura 85. Pistón vista superior.

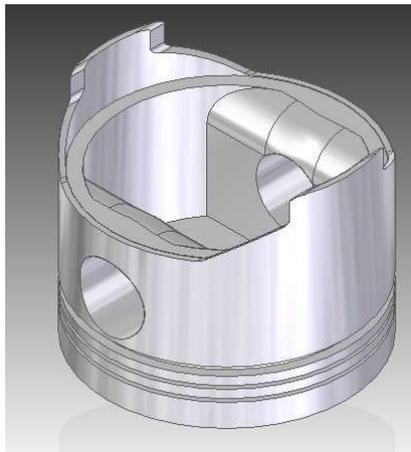


Figura 86. Pistón vista inferior.

Características de la pieza:

Dimensiones			Volumen (m ³)	Peso (g)	Complejidad	Material
Ancho (mm)	Largo (mm)	Alto (mm)				
73,4	73,4	60	$8,392 \cdot 10^{-5}$	230	Hueco bulón	Aleación de aluminio para fundición

Tabla 61. Características del pistón.

Posibles procesos de fabricación:

Proceso	Acabado	Aprovechamiento material	Coste	Otros
Consolidación ultrasónica	Malo	70%-80%	Alto	Se produce con laminas
Formación mediante polvo por laser	Malo	80%-100%	Alto	
Forja	Muy bueno	85%-95%	Medio	
Fundición a alta presión	Muy bueno	75%-80%	Alto	
Fundición a la cera perdida	Muy bueno	80%-85%	Bajo	Baja productividad
Fundición en molde de arena	Medio	60%-80%	Muy Bajo	
Fusión por haz de electrones	Medio	45%-55% (se reutiliza el sobrante)	Muy alto	
Fusión selectiva por laser	Malo	75%-85%	Alto	
Mecanizado por electroerosión	Muy bueno	80%-95%	Medio	Muy lento
Mecanizado y cortado por chorro abrasivo	Muy bueno	Pérdida de material arrancado	Bajo	Redondeos en cortes profundos
Molienda	Muy bueno	Pérdida de material arrancado	Bajo	
Prensado y sinterizado	Bueno	90%-97%	Medio	
Prototipado de moldes de cerámica 3D	Medio	40%-60%	Alto	Primero se crea un molde cerámico
Sinterizado selectivo por laser	Malo	50%-70% (se reutiliza el sobrante)	Alto	Necesita añadirse material para rellenar poros
Torneado/taladrado/separado	Bueno	Pérdida de material arrancado	Medio	

Tabla 62. Posibles procesos de fabricación del pistón.

Proceso seleccionado:

En primer lugar por medio del proceso de forja se consigue una pieza casi acabada. Para finalizar se procederá a varias operaciones de torneado, taladrado y separado.,

Resumen de la selección de los procesos de fabricación:

Pieza	Subpieza	Proceso	Acabado
Culatín		Prensado y sinterizado	Molienda
Culata		Impresión con aglutinante	Molienda
Válvula de disco de escape		Prensado y sinterizado	Molienda
Válvula de disco de admisión		Prensado y sinterizado	Molienda
Engranaje helicoidal válvula de escape		Forja	
Engranaje helicoidal + eje		Forja	
Piñón superior		Forja	
Rodamientos		Comercial: 3802-2RS	
Junta culatín-cilindro	Aro de fuego	Hoja de estampado, embutición y corte	Soldadura y unión con adhesivo
	Núcleo		
	Rec. Núcleo	Guillotinado y rasurado	
Junta culatín-culata	Núcleo	Hoja de estampado, embutición y corte	Soldadura por resistencia y unión con adhesivo
	Rec. Núcleo	Guillotinado y rasurado	
Junta tapa culata		Guillotinado y rasurado	
Tornillos culata- cilindro		Trefilado	
		Forja	
		Forja de la rosca	
Tapa culata		Moldeo BMC (DMC)	
Pistón		Forja	Mecanizados varios

Tabla 63. Resumen de los procesos de fabricación.

Una vez escogido el proceso de fabricación para cada pieza, estas son las descripciones a groso modo de cada proceso, sin entrar en detalles de las características del proceso. El proceso final de fabricación de cada pieza debería determinarse una vez determinada la composición final del material de cada pieza y se debe escoger el orden en que se realizan las operaciones de cada elemento, según la maquina con la que va a realizarse el proceso.

Prensado y sinterizado: En este proceso primero se convierte el material en polvo y si se desea se combinan distintos materiales y se mezclan bien. Una vez hecha la mezcla se mete en un molde el cual prensa la mezcla para obtener la forma deseada. Por último se procede al sinterizado que implica calentamiento a una temperatura por debajo del punto de fusión para provocar la unión de las partículas en estado sólido y el fortalecimiento de la pieza.

Impresión con aglutinante: este proceso consiste principalmente en la pulverización de un aglutinante líquido sobre un lecho de polvo que luego se solidifica. Los materiales suelen ser yeso, arena, cerámica y plásticos. La pieza hay que diseñarla en un software 3D para poder enviar a la maquina la información sobre las capas del objeto. La impresión se realiza por capas, los polvos son aplicados por un rodillo en la plataforma de construcción, el aglutinante se aplicada con un cabezal de impresión. Esta técnica permite imprimir en varios colores y el resultado no necesita mucho trabajo posterior. La pieza final se puede someter a sinterizado para mejorar algunas de sus propiedades.

Forja: es un proceso de modelado de materiales maleables golpeándolos o troquelándolos ya sea aplicándoles calor o directamente en frio. Éste proceso permite darle la forma deseada a la pieza, además mejora la estructura del material, principalmente porque refina su tamaño de grano. El metal forjado, en comparación con el fundido, es más fuerte y dúctil y muestra una mayor resistencia a la fatiga y el impacto.

Forja de la rosca: este proceso se basa en el principio de la forja, pero en vez de golpear, se aplica una fuerza que presiona la pieza contra unos filetes, y al hacerla rodar sobre éstos, se genera la geometría de la rosca.

Hoja de estampado, embutición y corte: el proceso consiste en colocar una lámina de metal entre dos matrices con formas determinadas que encajan entre ellas, al cerrar las dos matrices, una sobre la otra, la lámina se deforma con la forma de las matrices. Si lo que queremos es que se realicen cortes, las matrices tienen las protrusiones más largas y afiladas, y al realizar la deformación de algunas partes de la pieza lo que se consigue es separarlas y dejar orificios en la lámina.

Guillotinado y rasurado: este proceso es muy parecido al de hoja de estampado, embutición y corte, pero suele utilizarse en material muy elástico, con lo que sería complicado el corte, por lo que las matrices en este caso están afilada para favorecer el corte.

Trefilado: es un proceso por el cual se hace pasar un hilo del material deseado por una matriz con un tamaño inferior al del hilo inicial, de esta forma se reduce el diámetro o se le da la forma deseada a la sección del hilo. Con este proceso se consigue que el hilo tenga la medida deseada, dado que los hilos suelen venir enrollados y no tienen un diámetro homogéneo en toda su longitud.

Moldeo BMC (DMC): el proceso de moldeo consiste en colocar el composite, fibras y resina mezclados, en un molde, cerrar el molde y someterlo a presión hasta llegar al tamaño deseado, una vez cerrado se aplica calor para acelerar el curado de la resina.

Molienda: consiste en, por medio de un material abrasivo, rebajar las zonas en las que se desea eliminar parte del material, ya sea para eliminar imperfecciones o mejorar el acabado de la pieza. Para realizar el proceso se puede fijar la pieza y que el elemento abrasivo, ya sea una muela u otro elemento, se desplace por la zona a rebajar. También se puede realizar a la inversa y que sea el elemento abrasivo el que este fijo y se desplace la pieza.

Soldadura: es el proceso por el cual se unen dos o más piezas al fundir parte de su material y que se mezcle con el de la pieza en contacto, por lo que al enfriarse quedan las distintas piezas unidas. Los métodos de fundir materiales son muy variados, al igual que se puede realizar aportando material o no.

Unión con adhesivo: este proceso consiste en aplicar un elemento adhesivo en estado líquido entre las piezas a unir, una vez aplicado se someten a presión las dos piezas a unir y al secarse el adhesivo quedan unidos. Este proceso se suele utilizar para unir piezas con materiales con propiedades muy distintas que serían difíciles de unir por otros métodos.

Torneado, taladrado y separado: son varios procesos que consisten en arrancar parte del material para modificar la forma de alguna pieza. El torneado consiste en colocar la pieza sobre un soporte que gira y por medio de cuchillas se va eliminando material de la pieza base. El taladrado consiste en eliminar material de forma que se consiguen agujeros en el elemento. El separado se puede realizar de varias formas y consiste en eliminar partes grandes de la pieza base. Estos procesos se utilizan para mejorar el acabado de piezas generadas por otros procesos o directamente para fabricar piezas partiendo de un bloque base del material.

6.5. Elementos originales utilizados

Al utilizar un motor existente como base del proyecto se han utilizado muchos elementos del motor, en este punto se exponen los principales elementos que forman parte o influyen en el nuevo sistema de distribución por válvulas rotativas, además de algunas fotos de los elementos, se hace una pequeña descripción de la función que tienen en el sistema.

Cigüeñal:

Esta pieza consiste en un eje y un codo, en el cual se ajusta una biela, y está destinada a transformar el movimiento rectilíneo del pistón en rotativo.

Rodamientos cigüeñal:

El cigüeñal se monta sobre rodamientos que van montados en el bloque motor, para facilitar el movimiento de éste.

Biela:

Esta pieza se monta sobre el codo del cigüeñal, de forma que este conjunto consigue la transformación del movimiento rectilíneo, del pistón, en movimiento rotativo.



Figura 87. Cigüeñal y biela ensamblados.

Rodamiento biela:

Para conseguir el movimiento relativo, sin dificultades, se monta un rodamiento entre la biela y el codo del cigüeñal, dado que en este montaje se realiza a presión y en caliente, no se ha desmontado y no se observa en las imágenes, el rodamiento es de tipo rodamiento de agujas.

Bulón pistón-biela:

La unión entre el pistón y la biela se realiza por medio de un bulón, que atraviesa ambos elementos, en este caso el bulón se fija con dos circlips, uno a cada lado, y no necesita de rodamiento dado que el bulón realiza esta función y hay un canal de aceite que lubrica la zona de rozamiento entre el bulón y la biela.



Figura 88. Bulón pistón-biela.

Circlips pistón:

Para mantener el bulón en su lugar, y que la biela y el pistón no se separen, se montan dos circlip de seguridad, uno en cada extremo del orificio, por el que pasa el bulón, que atraviesa el pistón.

Piñón cigüeñal (distribución):

En uno de los extremos del cigüeñal, se monta un engranaje que encara con el piñón superior, montado en la culata, de forma que por medio de la cadena de distribución, estos dos se transmiten el movimiento.

Cadena distribución:

Este elemento, formado por eslabones, transmite el movimiento desde el engranaje del cigüeñal, hasta el engranaje superior.



Figura 89. Piñón cigüeñal y cadena de distribución.

Tensor cadena:

Para el montaje de la cadena es necesario una gran holgura, pero durante el funcionamiento esta holgura debe ser mínima, por lo que se monta un tensor, para eliminar la holgura una vez montado.

Patín cadena:

Para disminuir el rozamiento, entre la cadena y el tensor, y reducir el desgaste de la cadena, se monta un material, más blando, denominado patín, entre el tensor y la cadena.

Cilindro:

El cilindro es un bloque en el cual hay mecanizado un cilindro, por el cual se desplaza el pistón. En uno de los laterales, tiene mecanizada una cavidad, por la que pasa la cadena de distribución.



Figura 90. Cilindro vista superior.



Figura 91. Cilindro vista lateral.

Segmentos pistón:

Los segmentos son unos anillos que se montan sobre el pistón y hace estanca la unión entre el pistón y el cilindro, en este caso lleva tres segmentos, dos de compresión que se encargan de que los gases de la combustión no pasen al cárter y uno rascador o de engrase que se encarga de arrastrar el aceite y lubricar las paredes del cilindro.



Figura 92. Pistón original con los tres segmentos.

Bloque motor y elementos interiores:

También se han aprovechado todos los elementos del bloque motor, tales como: caja de cambios, sistema de embrague, sistema de lubricación, sistema de encendido. En las siguientes imágenes se pueden observar estos elementos.

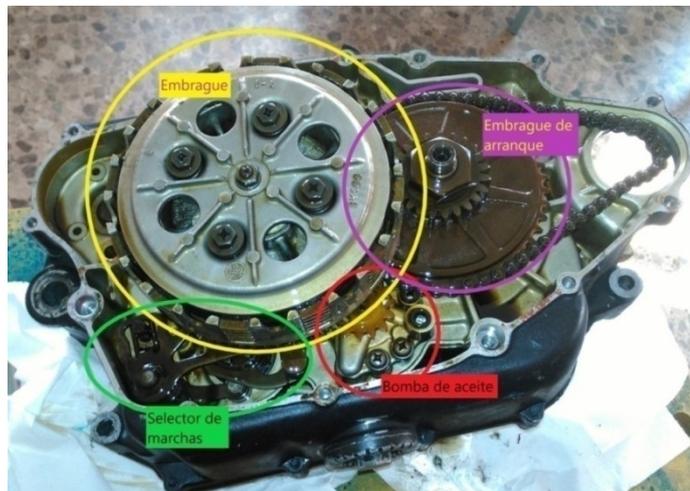


Figura 93. Interior del cárter lado del embrague.



Figura 94. Caja de cambios.



Figura 95. Plato magnético montado en el motor.

6.6. Ensamblaje

En cuanto al ensamblaje de las piezas de la parte nueva, en la primera imagen se puede observar los elementos internos del conjunto, los que una vez montado todo no se verían, estos son: Pistón, válvulas y los engranajes que transmiten y transforman el movimiento que va desde la cadena hasta las válvulas. En la imagen se observa su ubicación una vez montados todos los elementos. Además también se puede observar la colocación de la bujía.

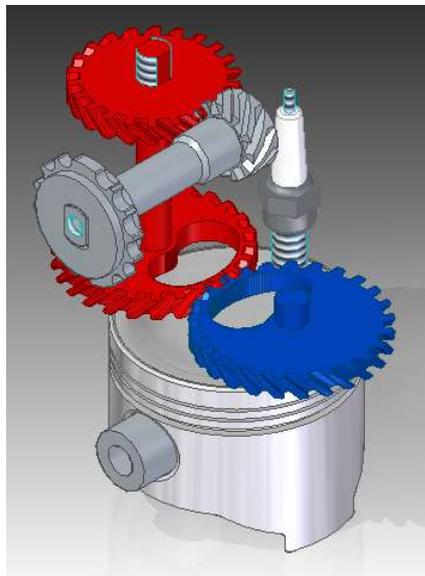


Figura 96. Elementos internos nuevo sistema.

En la siguiente imagen se puede observar el ensamblaje con el culatín, de esta forma se ve como las válvulas acoplan con la cámara de las válvulas mecanizada en el culatín y con la que deben formar un conjunto estanco para evitar pérdidas de compresión y en consecuencia de rendimiento. Además si este conjunto no fuera estanco, los gases y productos de la combustión pasarían al cárter y esto sería contraproducente.

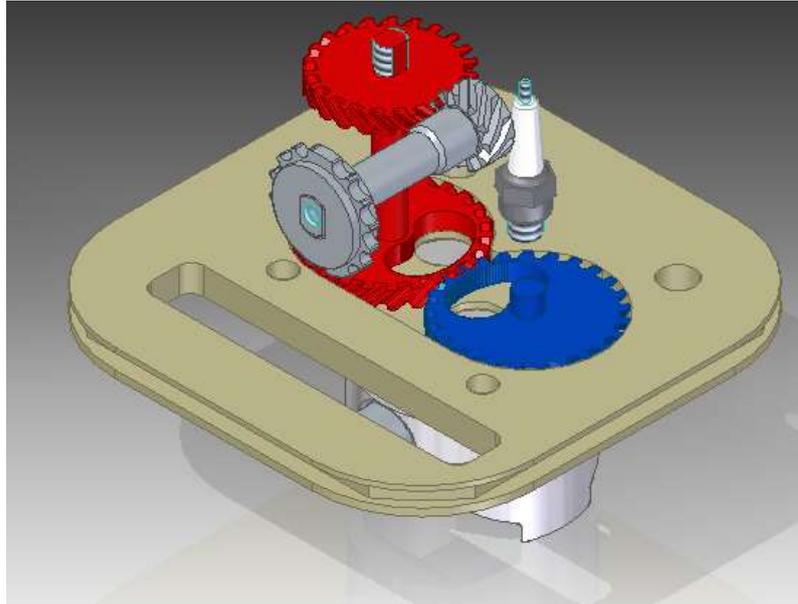


Figura 97. Modelo 3D del nuevo sistema sin culata.

En la imagen también se puede observar los orificios del culatín que permiten el paso de la cadena desde la parte baja del cárter y los orificios por donde pasan los tornillos que unen todo el conjunto.

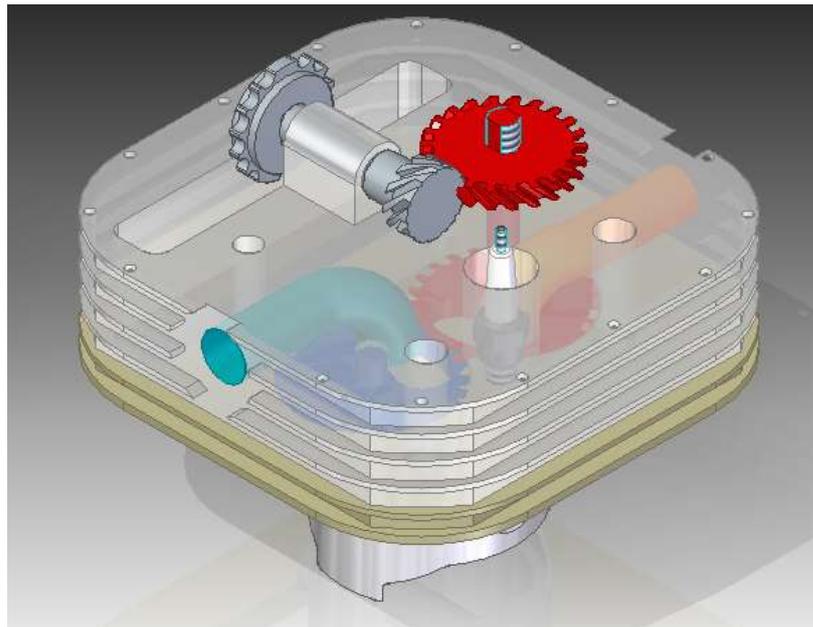


Figura 98. Modelo 3D del nuevo sistema con culata.

En esta imagen se puede observar el conjunto con la culata también montada, los elementos que faltarían serían: La tapa de la culata, que cubre los engranajes superiores y todos los elementos originales utilizados en el nuevo diseño, que irían montados por debajo del culatín, empezando por el cilindro. En la imagen se pueden observar los orificios, de escape (rojo) y admisión (azul), mecanizados en la culata, así como el soporte para el eje de transmisión.

6.7. Comparación sistema original con el nuevo sistema

En este apartado se compara parámetros, tales como: peso y tamaño, del modelo original en contraposición del nuevo diseño.

En cada punto se compara las piezas con sus equivalentes o grupo de equivalente y se finaliza comparando el conjunto completo, de forma que se puede apreciar las diferencias entre las piezas originales y las nuevas, de forma que se puede ver en que punto es mejor el nuevo diseño o el original, dado que no todo son ventajas con la nueva variante, también existen desventajas e inconvenientes.

Peso: Es una característica importante dado que la reducción de peso reduce las inercias y facilita la manipulación tanto en el montaje como en la utilización de los elementos.

Tamaño: El tamaño es un punto importante, porque el hecho de reducir el tamaño te permite modificar con mayor facilidad la distribución de elementos en el vehículo o reducir el tamaño de algunas zonas, de forma que mejore algunas prestaciones.

Peso

En este apartado se ha comparado cada pieza original con su pieza equivalente, o conjunto de piezas, utilizando como comparación el peso de cada elemento. En cuanto al peso se ha conseguido una reducción sustancial en la mayoría de elementos. Teniendo en cuenta su tamaño, dado que algunos por su tamaño parece que la reducción no sea tan importante, pero si tenemos en cuenta el porcentaje de reducción, se hace visible el cambio. En la comparación del peso total de cada conjunto se observa claramente la reducción obtenida que es de 1800 g, lo cual en un motor pequeño y de pequeña potencia supone una gran diferencia.

Elemento Original	Original (g)	Elemento Modificado	Modificado (g)
Culata	3880	Culatín	580
		Culata	2330
		Tapa culata	0,32
Válvula de escape	60	Válvula de disco de escape	50
Muelles válvula escape	80		
Arandela cónica válvula de escape	20		
Válvula de admisión	80	Válvula de disco de admisión	40
Muelles válvula de admisión	80		
Arandela cónica válvula de admisión	20		

Tabla 64. Comparación peso (1/2)

Elemento Original	Original (g)	Elemento Modificado	Modificado (kg)
Balancines	260	Engranaje helicoidal válvula de escape	90
Árbol de levas	350	Engranaje helicoidal + eje	100
Rodamientos	80 x 2	Rodamientos	10 x 2
Piñón superior	140	Piñón superior	70
Junta culata-cilindro	40	Junta culatín-cilindro	50
		Junta culatín-culata	40
		Junta tapa culata	20
Tornillos culata-cilindro (4 unidades)	110	Tornillos culata-cilindro (4 unidades)	90
Pistón	230	Pistón	230
Total	5510	Total	3710

Tabla 65.Comparación peso (2/2)

Tamaño

Otro punto importante en la comparación de los dos modelos es el tamaño, dado que el nuevo diseño permite hacer un motor más bajo, lo cual permite otro tipo de montaje en el vehículo y puede dar espacio a otros elementos o reducir el tamaño de la zona del motor en futuros diseños. En la tabla se puede observar en que elemento se han producido la mayoría de reducciones, algunas piezas no son relevantes para el tamaño final del conjunto, dado que se montan en el interior de piezas mayores, pero se ha optado por comparar todas las piezas, y en el total se tienen en cuenta el tamaño del conjunto montado, de forma que se puede apreciar la reducción del tamaño del motor montado. La reducción que se consigue con el nuevo sistema es de 67 mm en altura, 28 mm de largo y de 10 mm de ancho y una reducción en el volumen de 3 074 480 mm³.

Elemento	Original		Elemento	Modificado	
	Medidas (mm)	Volumen (mm ³)		Medidas (mm)	Volumen (mm ³)
Culata	200 x 180 x 165	5 940 000	Culatín	172 x 170 x 11	321 640
			Culata	172 x 170 x 60	1 754 400
			Tapa culata	172 x 170 x 45	1 315 800

Tabla 66. Comparación tamaño (1/2)

Elemento	Original		Elemento	Modificado	
	Medidas (mm)	Volumen (mm ³)		Medidas (mm)	Volumen (mm ³)
Válvula de escape	31,5 x 31,5 x 100	77 931	Válvula de disco de escape	59 x 59 x 75,5	206 414
Muelles válvula escape	31 x 31 x 43	32 455			
Arandela válvula de escape	30,5 x 30,5 x 8	5 844			
Válvula de admisión	38 x 38 x 100	113 411	Válvula de disco de admisión	59 x 59 x 15	41 009
Muelles válvula de admisión	31 x 31 x 43	32 455			
Arandela válvula de admisión	30,5 x 30,5 x 8	5 844			
Balancines (2 unidades)	89 x 54 x 38	182 628	Engranaje helicoidal válvula de escape	50 x 50 x 7	13 744
Árbol de levas	40 x 40 x 96	120 637	Engranaje helicoidal + eje	25 x 25 x 70	34 361
Piñón superior	82 x 82x 10	52 810	Piñón superior	41 x 41 x 10	13 202
Rodamientos	47 x 47 x 12	20 819	Rodamientos	24 x 24 x 7	3 166
Junta culata-cilindro	145 x 145 x 2	42 050	Junta culatín-cilindro	160 x 158 x 2	50 560
			Junta culatín-culata	172 x 170 x 2	58 480
			Junta tapa culata	172 x 170 x 2	58 480
Tornillos culata-cilindro	20 x 20 240	75 398	Tornillos culata-cilindro	20 x 20 x 163	51 207
Pistón	73,4 x 73,4 x 65	275 039	Pistón	73,4 x 73,4 x 60	253 882
Total	5 940 000 mm³		Total	2 865 520 mm³	

Tabla 67.Comparación tamaño (2/2)

7. Condiciones de diseño

Para el diseño final del nuevo sistema de distribución por válvulas de disco se han tenido en cuenta diversos puntos, los cuales se han expuesto en este punto. Las condiciones han venido influenciadas tanto por las características originales del motor como por características del nuevo sistema que podrían ocasionar problemas durante su funcionamiento.

Lubricación

La principal condición de diseño de este sistema era que las válvulas necesitaban de lubricación para su correcto funcionamiento, y esto provocaría el problema de que entrase aceite en la cámara de combustión y empeorara la combustión, reduciendo el rendimiento del motor y consumiendo el aceite. Este problema era lo primero que había que solucionar, por lo que se optó por utilizar materiales cerámicos para las válvulas, culatín y culata. Los materiales cerámicos además de soportar altas temperaturas y choques térmicos, no necesitan de lubricación para su funcionamiento en constante rozamiento. De esta forma se elimina el problema de que el aceite pase a la cámara de combustión y además el hecho de que el aceite no esté cerca de la zona más caliente del motor, hace que este se degrade menos y pueda durar más kilómetros sin ser sustituido.

En el caso de querer realizar las válvulas, culata y culatín en acero, para reducir costes, se podrían montar aros metálicos flexibles, parecido a los segmentos del pistón. Los cuales se montarían sobre las válvulas, dos en cada válvula: uno superior y otro inferior, los cuales sellarían la unión entre las válvulas, el culatín y la culata. De esta forma se podría lubricar la zona sin que el aceite entrara en la cámara de combustión.

Estanqueidad válvulas:

Otro punto muy importante es la estanqueidad de la cámara de las válvulas, al haber grandes temperaturas y presiones es fácil que haya fugas de gases entre las válvulas, el culatín y la culata, Pero al fabricar las piezas en material cerámico, tenemos coeficientes de dilatación muy bajos, lo que permite que el motor en frío tenga las mínimas holguras y a su vez que cuando se caliente no se produzcan agarrotamientos, de esta forma durante la combustión, debido a las altas presiones, las válvulas no se separaran del culatín dejando escapar gases, y realmente durante la admisión y el escape la inercia de los gases los hace circular por los colectores y no hay problemas de este tipo.

En caso de no poder mantener las holguras necesarias para conservar la estanqueidad, se podrían montar unos anillos de estanqueidad similares a los utilizados en los pistones, que podrían ser los mismo que los expuestos en la condición de diseño de lubricación o se podría optar como en los pistones y poner varios aros de forma que nos aseguraríamos mas de tener menos perdidas de compresión.

Colocación de las válvulas y sistema de transmisión.

Al utilizar un motor ya existente la geometría de éste influye en la forma, tamaño y colocación de los nuevos elementos, en el caso de las válvulas y de la transmisión de movimiento desde el cigüeñal hasta las válvulas ha influido mucho y ha dificultado el diseño. En cuanto a las válvulas los orificios para los tornillos, que unen todos los elementos al bloque del motor, delimitan el tamaño de la cámara de válvulas y por lo tanto delimita el tamaño de las válvulas, como solución se ha reducido el tamaño que tenían las válvulas en el diseño original y se ha ajustado al motor. En lo que se refiere a la transmisión de movimiento desde el cigüeñal al utilizar el hueco original para pasar la cadena desde el cigüeñal hasta la culata obliga a montar un sistema de engranajes helicoidales perpendiculares de forma que se

consigue el cambio de dirección para conseguir la transmisión del movimiento hasta las válvulas.

En el caso de que este sistema de distribución por válvulas de disco se montara en un motor diseñado desde cero, se tendrían en cuenta estos puntos y no supondrían un inconveniente tan importante, incluso se podría simplificar el sistema de transmisión de movimiento.

Colocación bujía.

En el motor original la colocación de la bujía es relativamente sencilla, dado que el tamaño de las válvulas deja espacio para su montaje. En el caso de las válvulas de disco, su tamaño es mayor en lo que ha cubrir el cilindro se refiere, y la bujía debe ser accesible desde el exterior para que le llegue el cable de alta tensión.

El problema principal radicaba en que al utilizar el espacio original de la cadena de distribución, la configuración de las válvulas y el sistema de transmisión de movimiento estaba limitado, por lo que se optó por desplazar las válvulas respecto del cilindro, para dejar sitio a la bujía, que no queda completamente centrada, que sería lo óptimo, pero está cerca del centro y además es accesible desde el exterior, para poder conectarle el cable de alta tensión y poder desmontarla y montarla de forma sencilla.

8. Planos

Para el estudio y diseño de las piezas se ha decidido por modelarlas con el programa, de diseño 3D, Solid Works. Se han creado las piezas una a una y luego se ha procedido a su ensamblaje en un motor virtual. Además se han hecho planos de cada pieza para su estudio y fabricación.

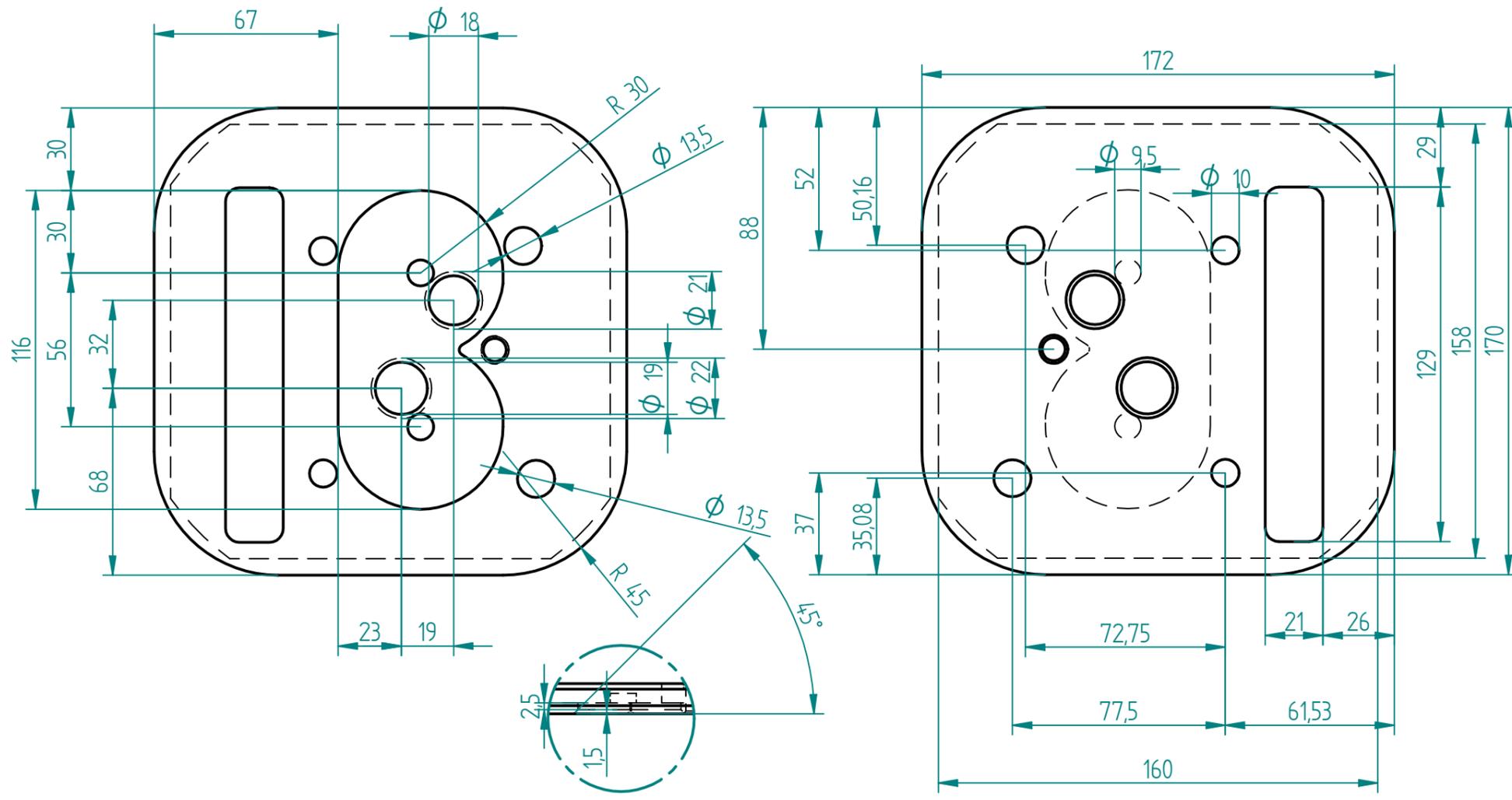
Las piezas se han creado sobre una base, que sería un modelo con las medidas del modelo original, las piezas se han ido creando y ajustando partiendo de esta base y siguiendo el orden de montaje de los elementos, de forma que cada elemento ajusta con el anterior creado, de igual manera esto condiciona el diseño y medidas de cada elemento, por lo que las piezas creadas antes condicionan a las creadas mas tarde. Esto sería un fallo, dado que el diseño podría ser diferente, que no mejor ni peor, en el caso de que a todas las piezas se les diera la misma importancia, pero en ese caso se podrían obtener diferentes diseños y el estudio seria más complejo. Además, como se ha optado por utilizar un motor ya existente, lo lógico es darle importancia principalmente a los elementos que no se van a modificar o cambiar y crear el sistema partiendo de las piezas que están en contacto directo con éstas. Hay que añadir que se ha seguido el orden de prioridad según el montaje, pero en algunos casos se han modificado piezas ya creadas para facilitar el diseño de las nuevas piezas, de forma que el diseño se ajuste mejor.

Para el diseño se han tenido en cuenta, además de la forma y medidas, que cumplan su función, con el menor espacio y conservando un funcionamiento óptimo, además de favorecer el montaje de forma que se necesite los mínimos útiles específicos y que además se pueda realizar el montaje sin necesidad de ayuda, ya sea de otras personas o ayuda mecánica.

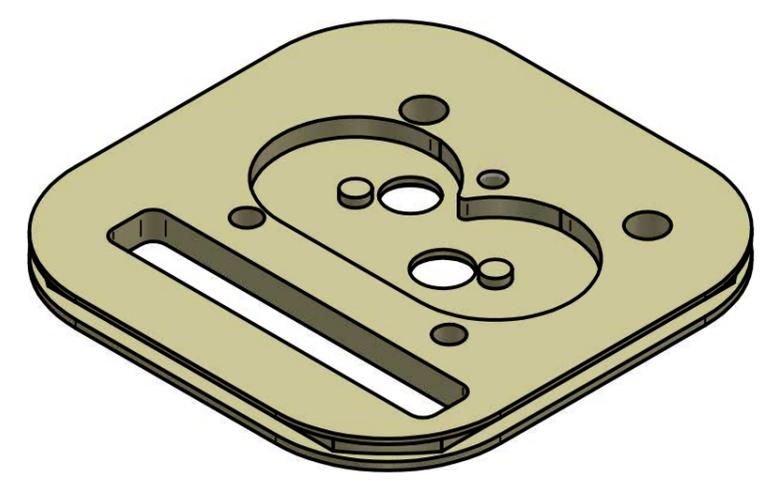
Una vez creadas las piezas, se ha procedido a la realización de planos de cada pieza, con la ayuda del propio programa de diseño 3D. Estos planos, además de mostrar la morfología de cada elemento, sirven para su fabricación y posterior comprobación de medidas, para asegurarse su correcto funcionamiento y ajuste al ser montadas.

Índice de planos:

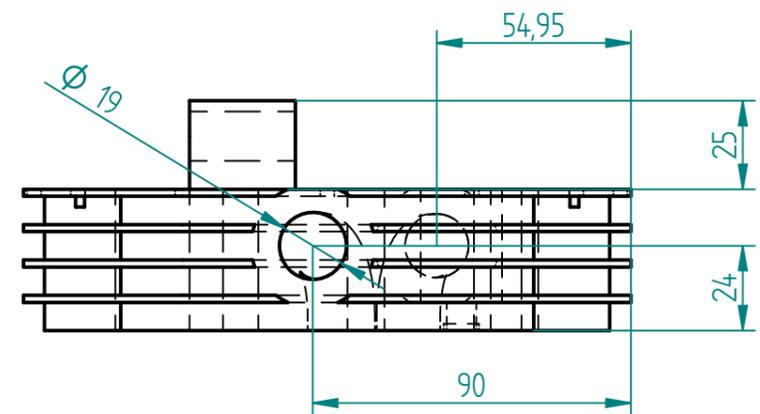
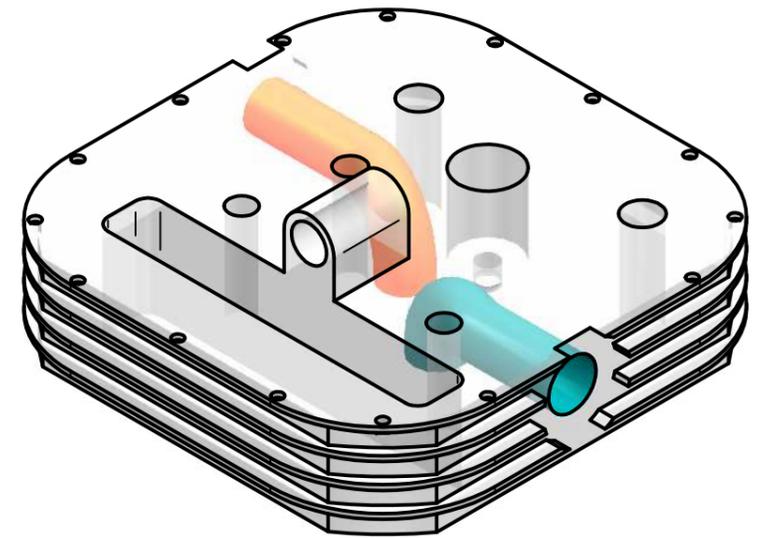
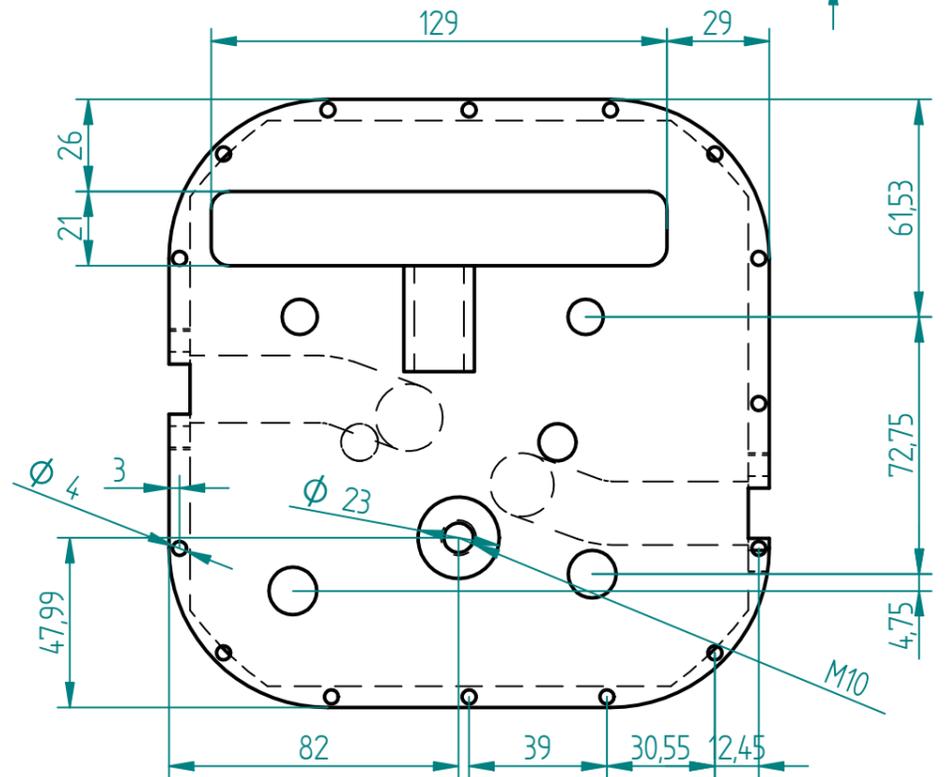
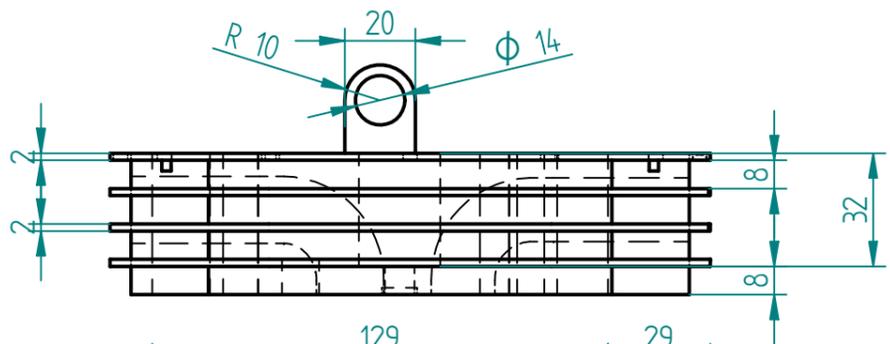
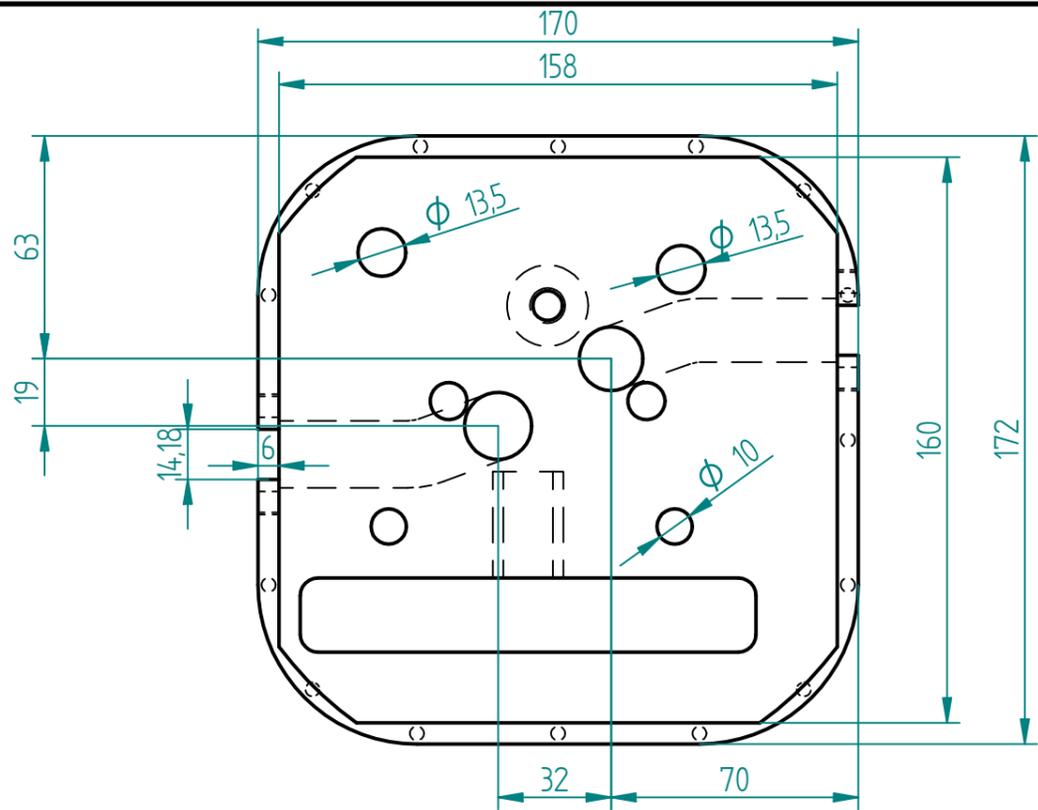
- Plano culatín.	Pg. 133
- Plano culata.	Pg. 134
- Plano Válvula de escape.	Pg. 135
- Plano válvula de admisión.	Pg. 136
- Engranaje helicoidal válvula de escape.	Pg. 137
- Engranaje helicoidal + eje.	Pg. 138
- Plano Piñón superior.	Pg. 139
- Plano junta culatín – cilindro.	Pg. 140
- Plano junta culatín – culata.	Pg. 141
- Junta tapa culata.	Pg. 142
- Tapa culata.	Pg. 143
- Pistón.	Pg. 144



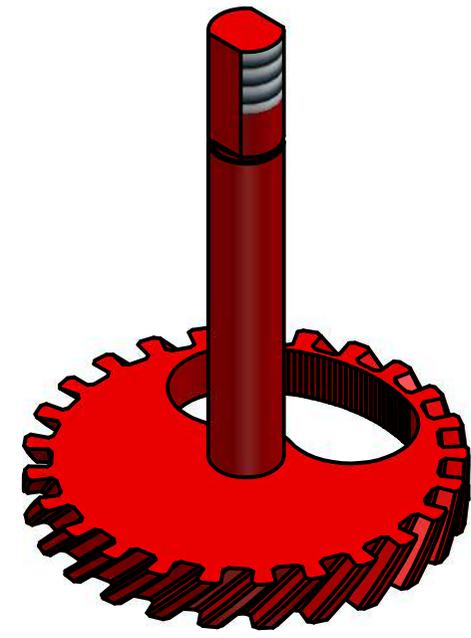
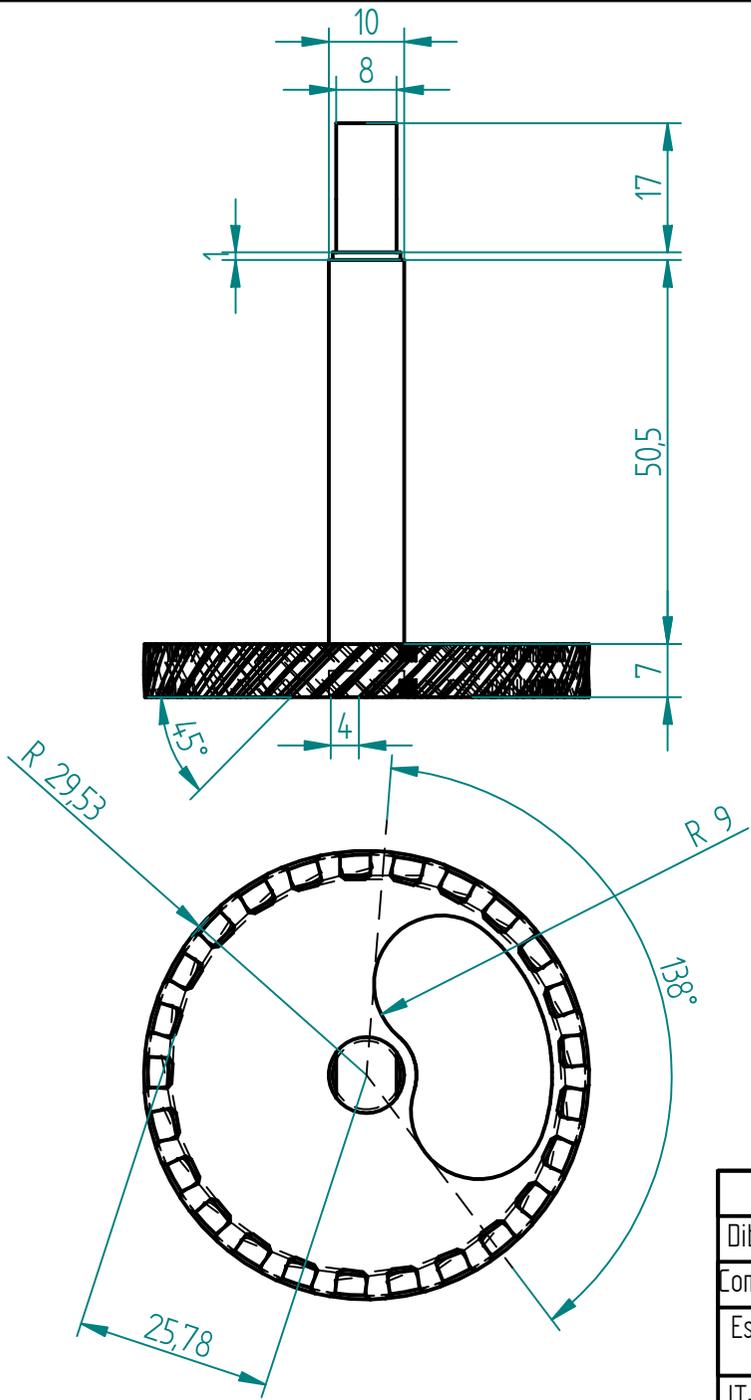
DETALLE A



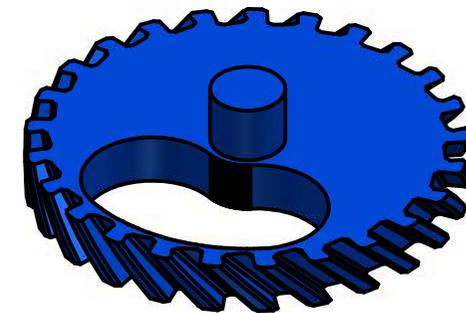
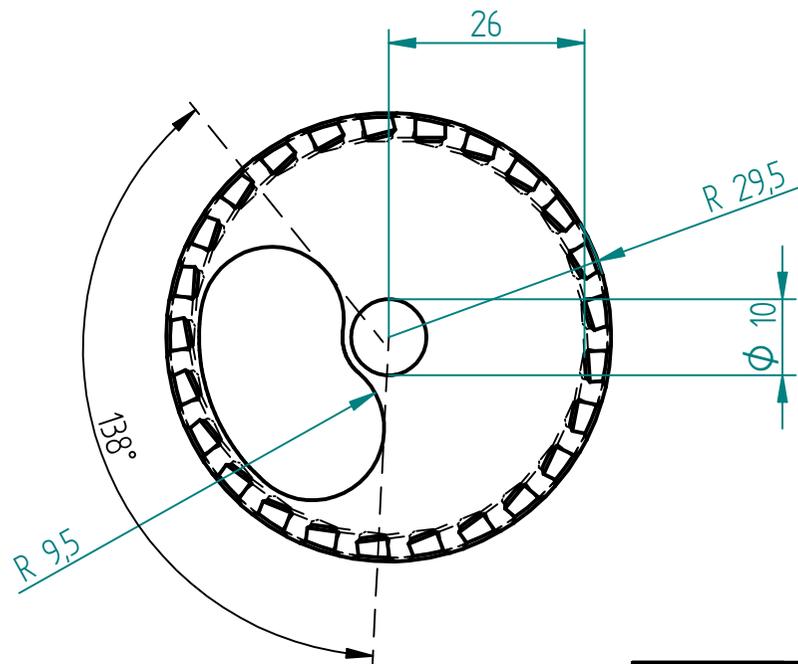
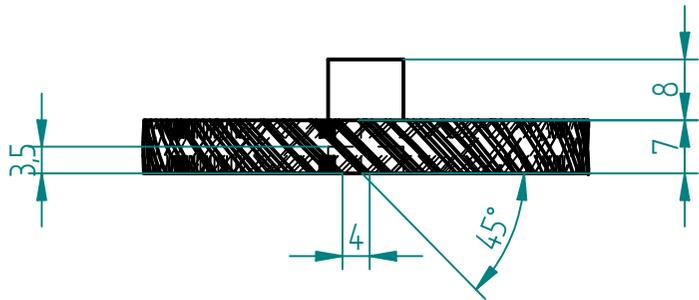
	Fecha	Nombre	Firmas	Diseño de un sistema de distribución con válvulas de disco para un motor de combustión
Dibujado	05/7/18	Francisco Jose		
Comprobado				
Escala 1 : 2	Nombre plano			Numero: 1
IT-5	Culatrín			Sustituye a:
				Sustituido por:



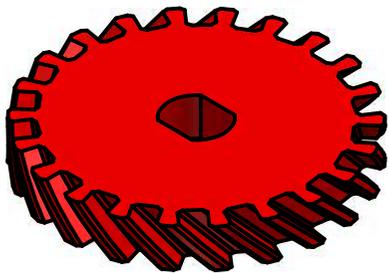
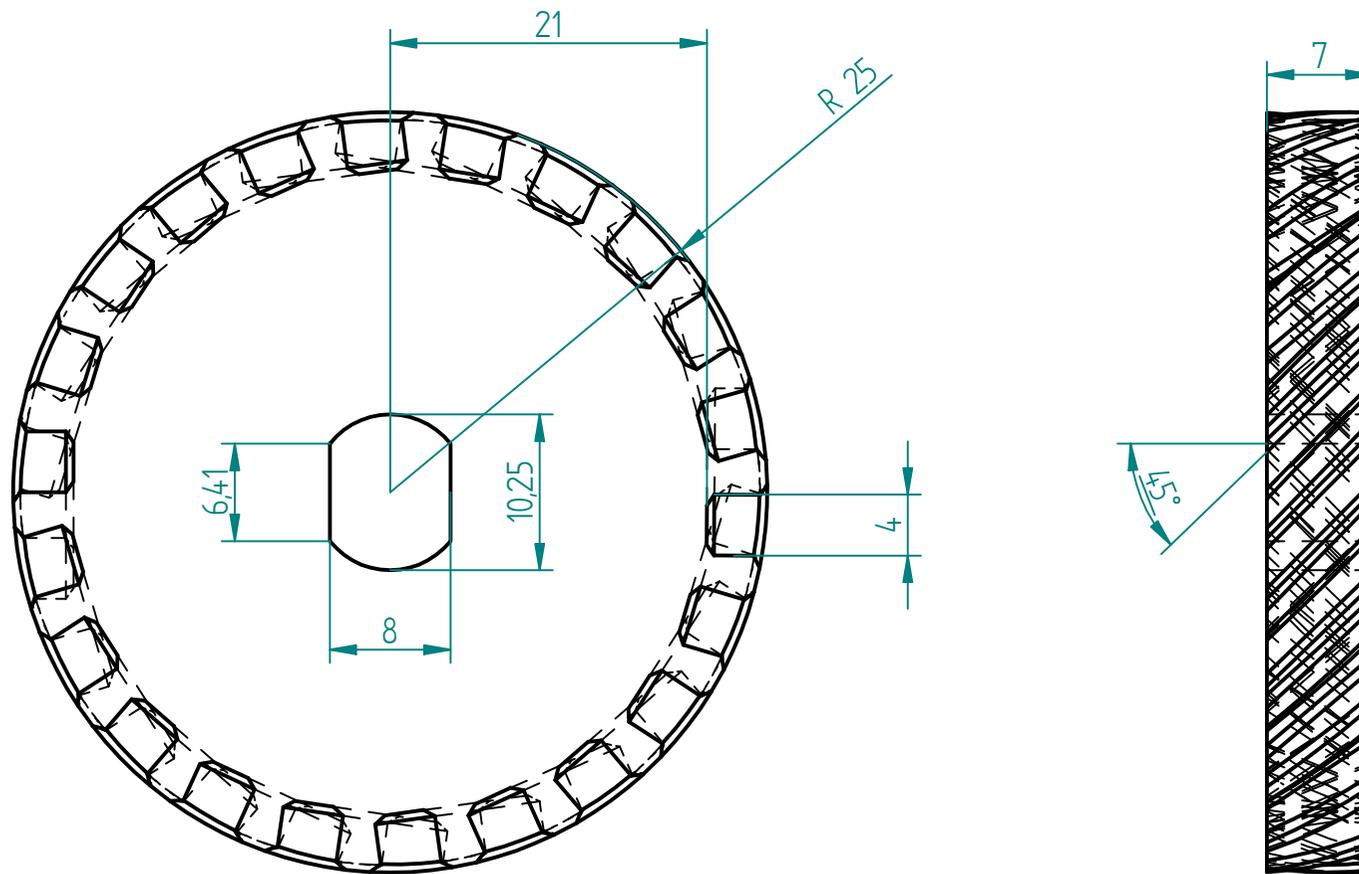
	Fecha	Nombre	Firmas	Diseño de un sistema de distribución con válvulas de disco para un motor de combustión
Dibujado	05/7/18	Francisco Jose		
Comprobado				
Escala 1 : 2	Nombre plano			Numero: 2
IT-5	Culata			Sustituye a:
				Sustituido por:



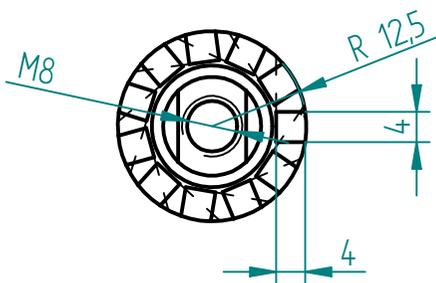
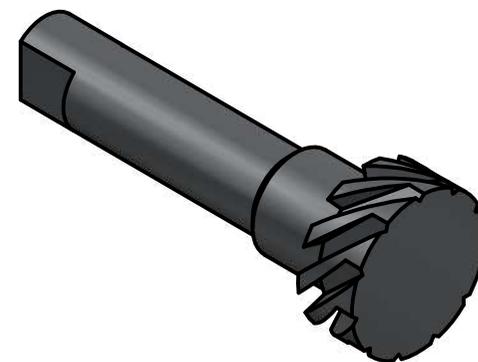
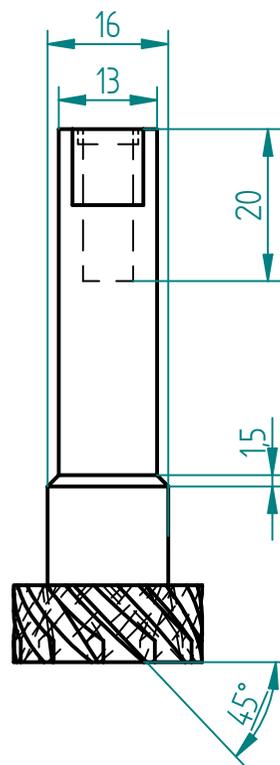
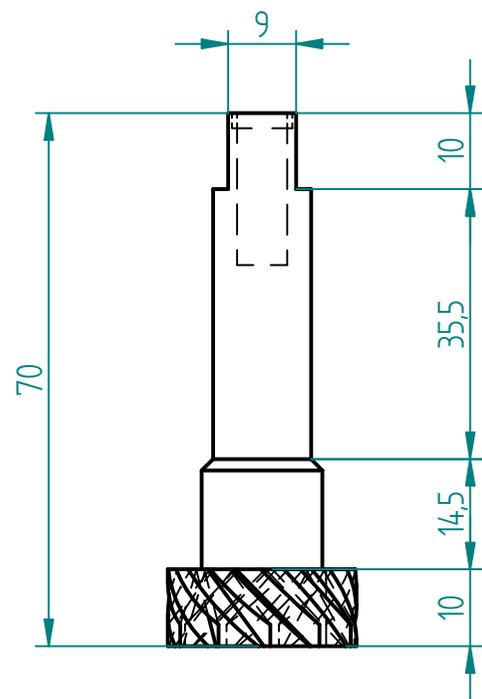
	Fecha	Nombre	Firmas	Diseño de un sistema de distribución con válvulas de disco para un motor de combustión
Dibujado	05/7/18	Francisco Jose		
Comprobado				
Escala 1 : 1	Nombre plano			Numero: 3
IT-5	Valvula de escape			Sustituye a:
				Sustituido por:



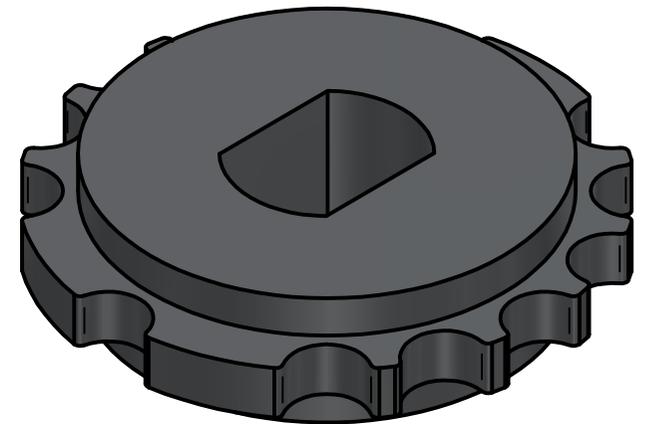
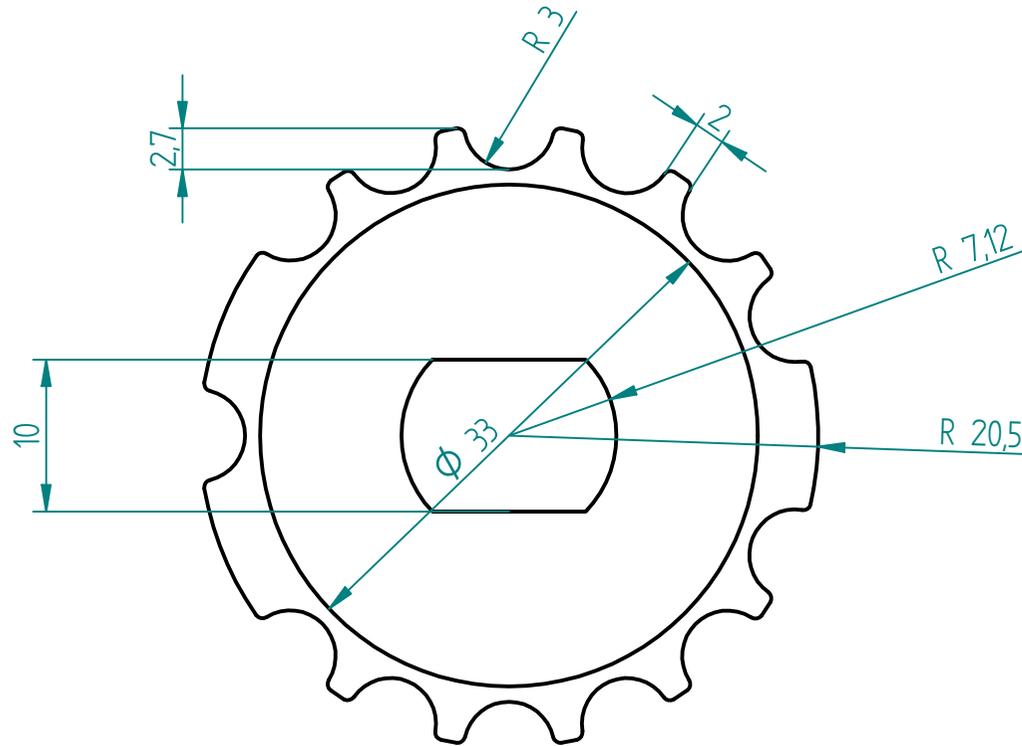
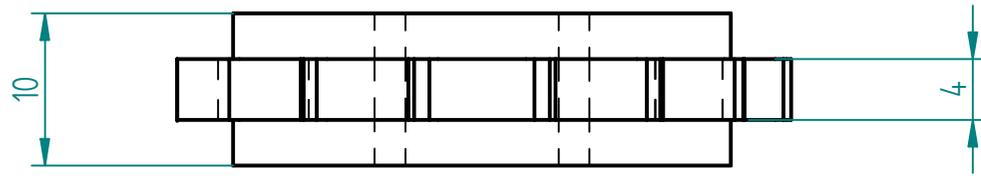
	Fecha	Nombre	Firmas	Diseño de un sistema de distribución con válvulas de disco para un motor de combustión
Dibujado	05/7/18	Francisco Jose		
Comprobado				
Escala 1 : 1	Nombre plano			Numero: 4
IT-5	Valvula de admision			Sustituye a:
				Sustituido por:



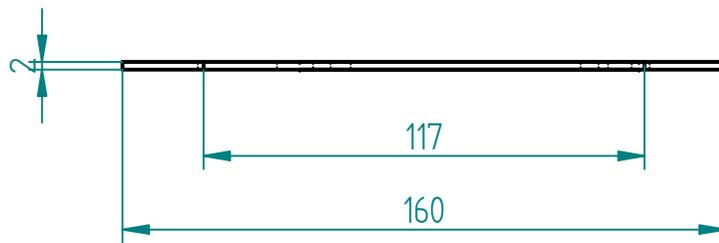
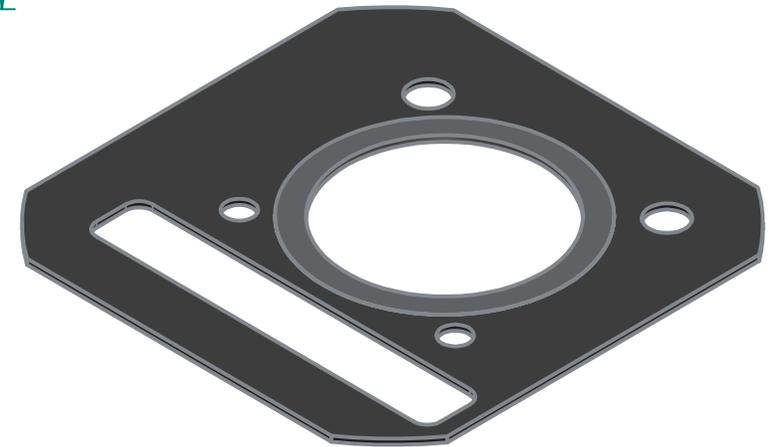
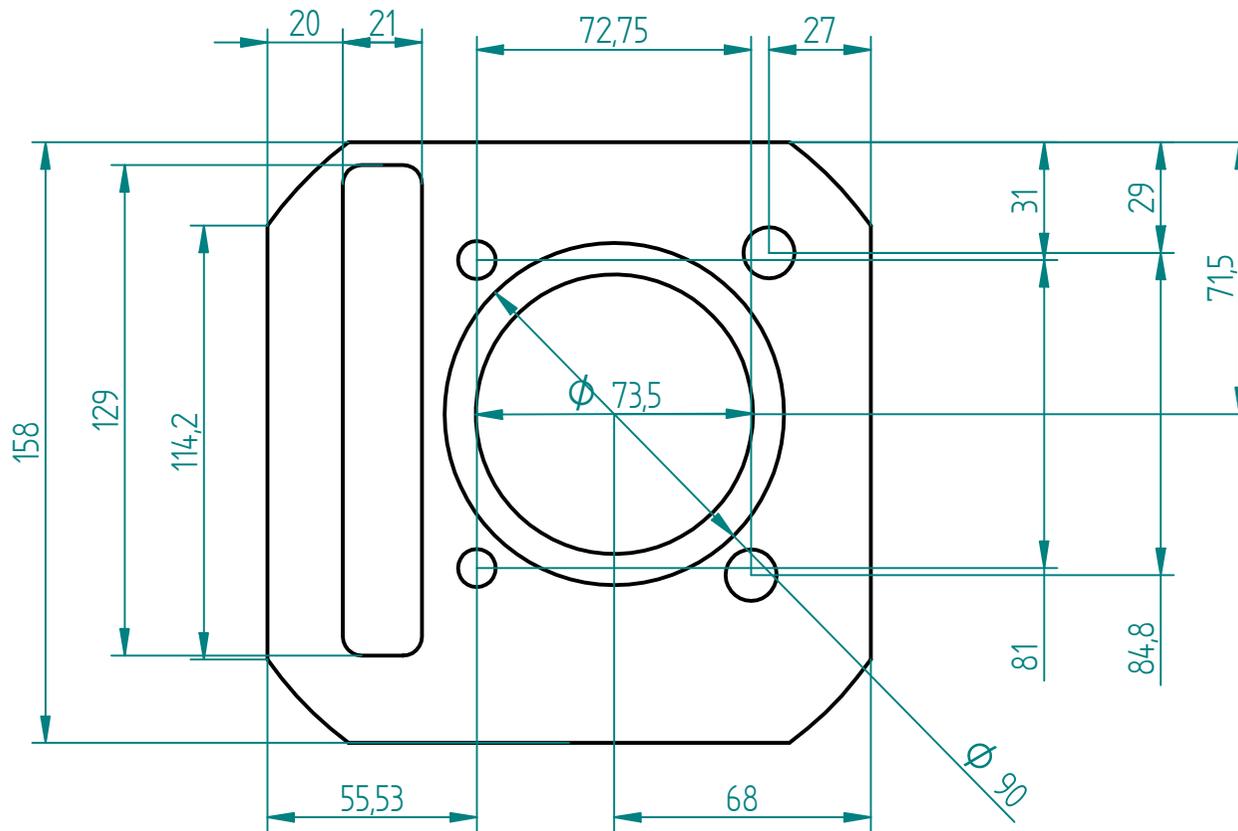
	Fecha	Nombre	Firmas	Diseño de un sistema de distribución con válvulas de disco para un motor de combustión
Dibujado	05/7/18	Francisco Jose		
Comprobado				
Escala 2 : 1	Nombre plano			Numero: 5
IT-9	Engranaje superior			Sustituye a:
				Sustituido por:



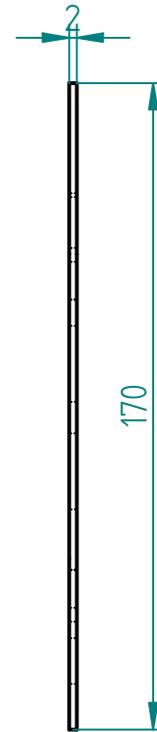
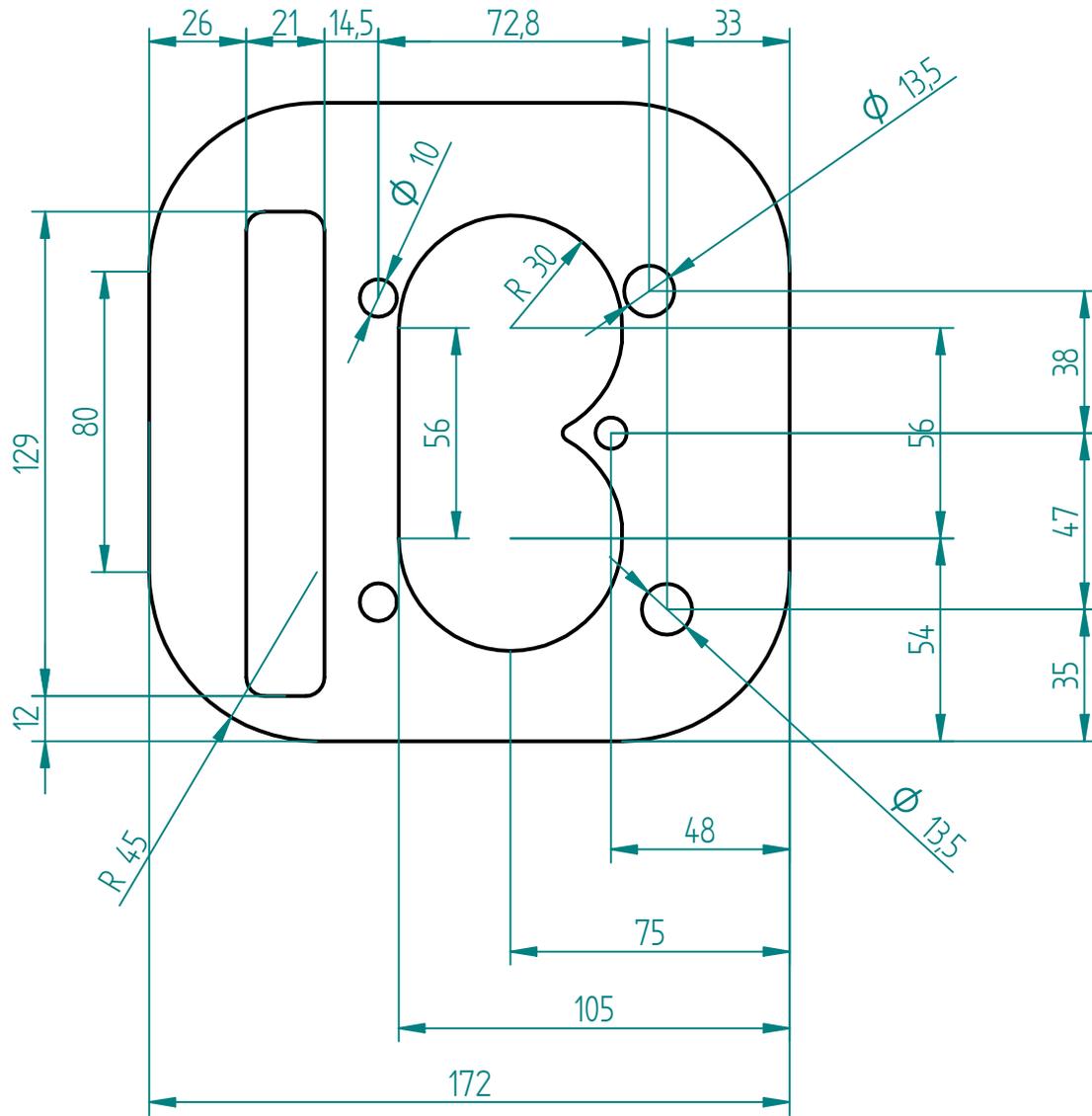
	Fecha	Nombre	Firmas	Diseño de un sistema de distribución con válvulas de disco para un motor de combustión
Dibujado	05/7/18	Francisco Jose		
Comprobado				
Escala 1 : 1	Nombre plano			Numero: 6
IT-7	Engranaje helicoidal			Sustituye a:
				Sustituido por:



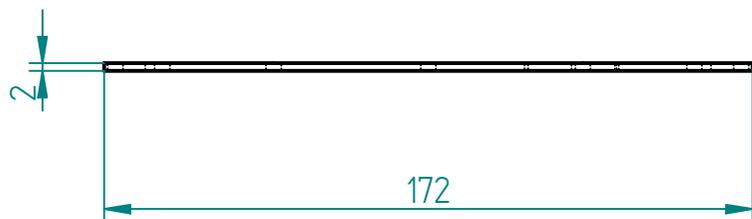
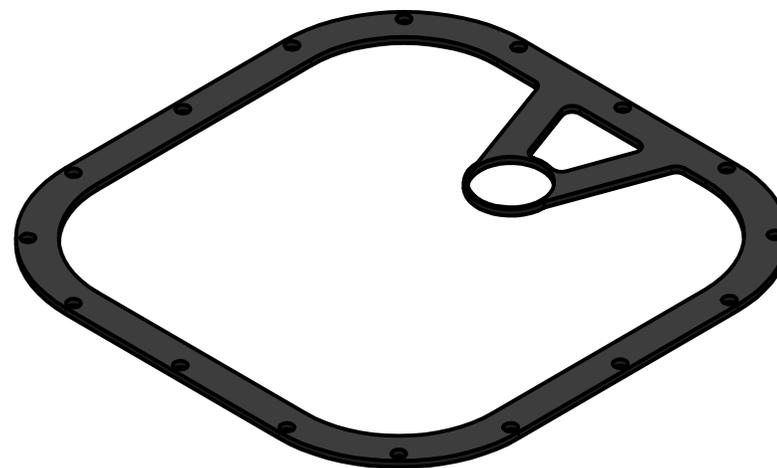
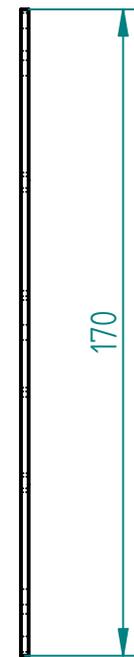
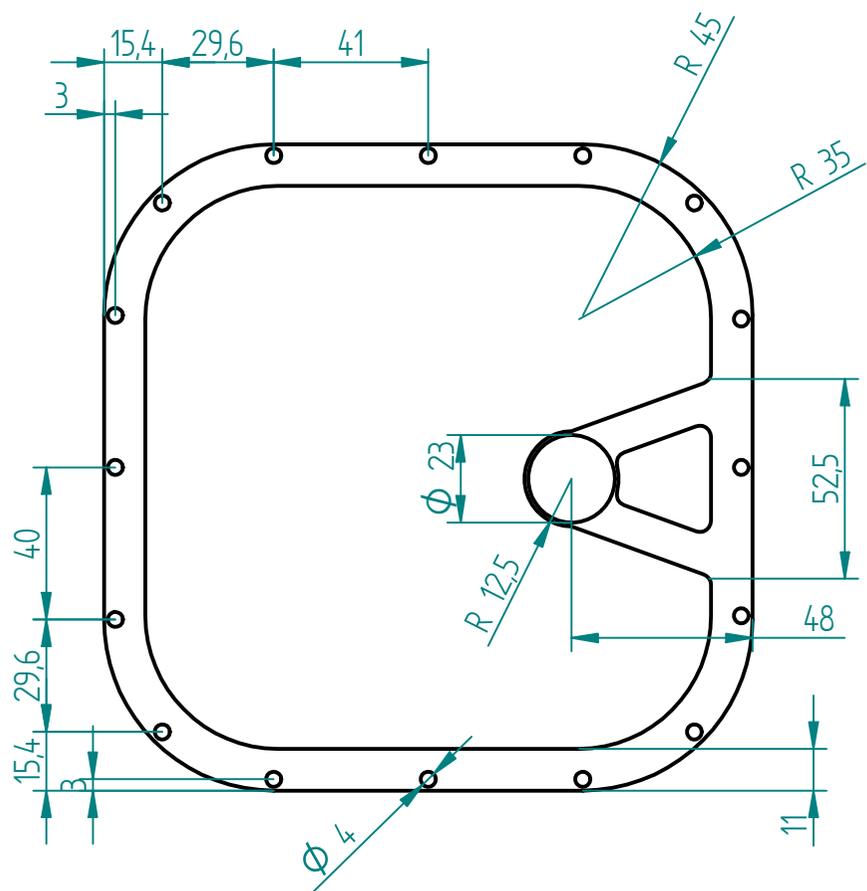
	Fecha	Nombre	Firmas	Diseño de un sistema de distribución con válvulas de disco para un motor de combustión
Dibujado	05/7/18	Francisco Jose		
Comprobado				
Escala 2 : 1	Nombre plano			Numero: 7
IT- 9	Piñón superior			Sustituye a:
				Sustituido por:



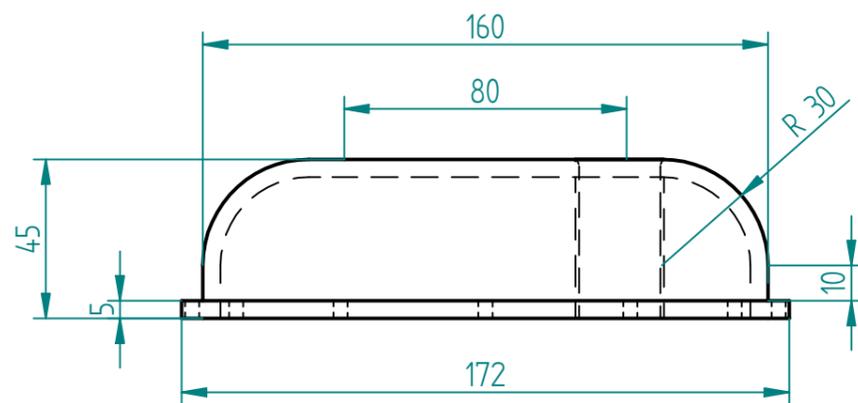
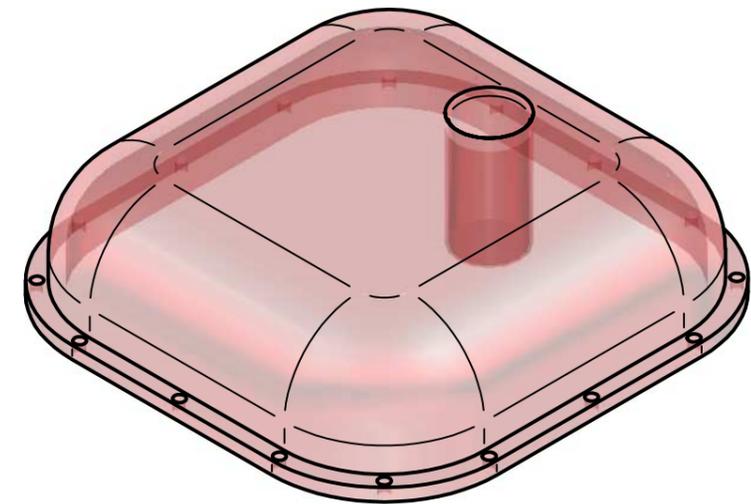
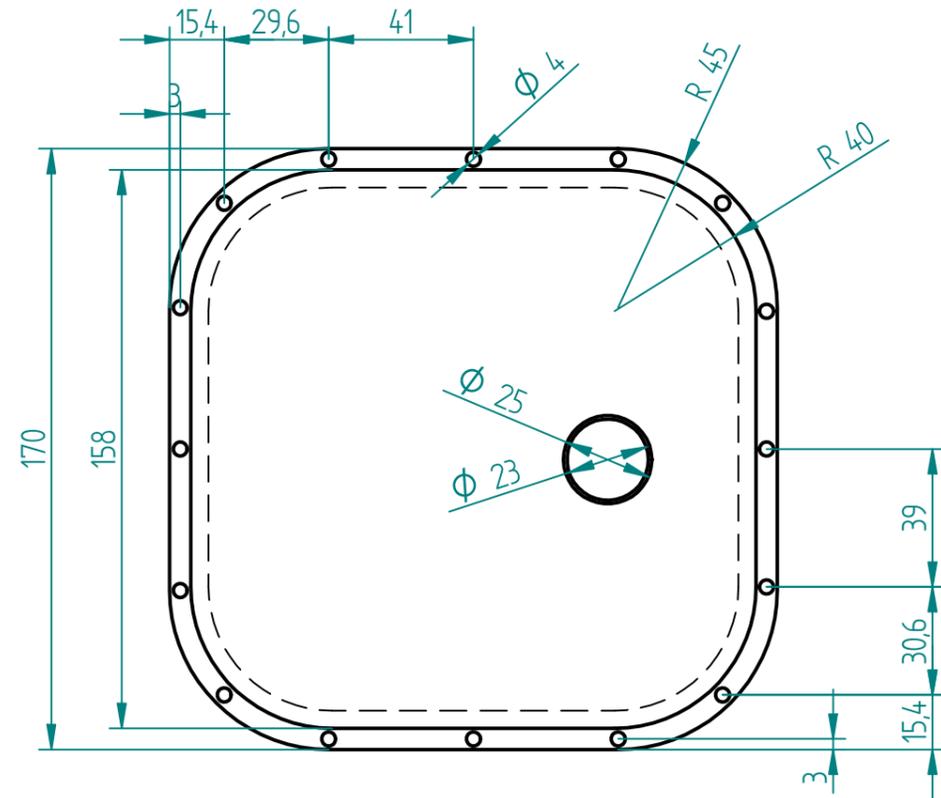
	Fecha	Nombre	Firmas	Diseño de un sistema de distribución con válvulas de disco para un motor de combustión
Dibujado	05/7/18	Francisco Jose		
Comprobado				
Escala 1 : 2	Nombre plano			Numero: 8
IT-12	Junta culatin-cilindro			Sustituye a:
				Sustituido por:



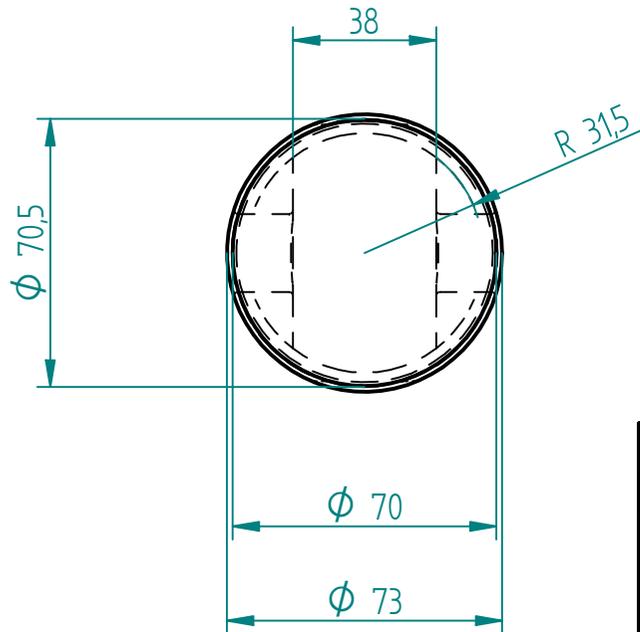
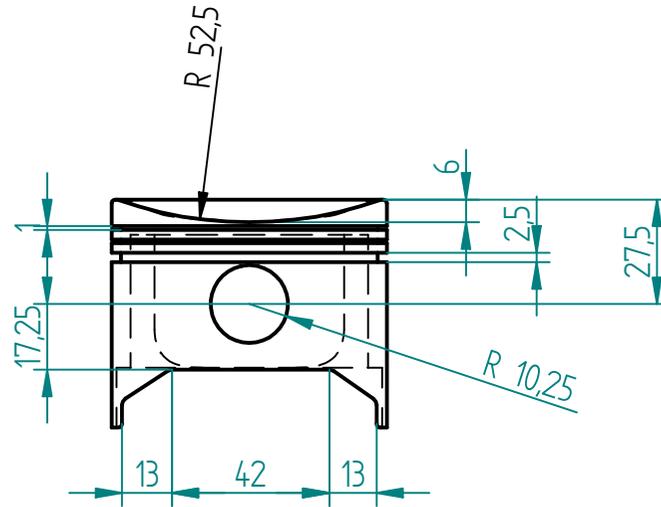
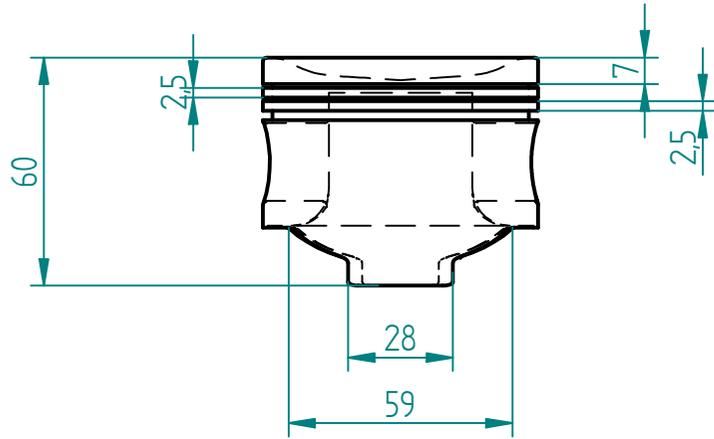
	Fecha	Nombre	Firmas	Diseño de un sistema de distribución con válvulas de disco para un motor de combustión
Dibujado	05/7/18	Francisco Jose		
Comprobado				
Escala 1 : 2	Nombre plano			Numero: 9
IT-12	Junta culatin-culata			Sustituye a:
				Sustituido por:



	Fecha	Nombre	Firmas	Diseño de un sistema de distribución con válvulas de disco para un motor de combustión
Dibujado	05/7/18	Francisco Jose		
Comprobado				
Escala 1 : 2	Nombre plano			Numero: 10
IT-12	Junta tapa superior			Sustituye a:
				Sustituido por:



	Fecha	Nombre	Firmas	Diseño de un sistema de distribución con válvulas de disco para un motor de combustión
Dibujado	05/7/18	Francisco Jose		
Comprobado				
Escala 1 : 2	Nombre plano			Numero: 11
IT-12	Tapa culata			Sustituye a:
				Sustituido por:



	Fecha	Nombre	Firmas	
Dibujado	05/07/18	Francisco Jose		Diseño de un sistema de distribución con válvulas de disco para un motor de combustión
Comprobado				
Escala 1:2	Nombre plano:			Numero: 12
IT-7	Piston			Sustituye a:
				Sustituido por:

9. Pliego de condiciones

Dado que el proyecto se trata de la transformación de un motor, de combustión con válvulas convencionales a uno con válvulas rotativas, el pliego de condiciones se centrará en la correcta realización de la transformación y en la correcta fabricación de las nuevas piezas

La transformación se ha abarcado en varios pasos: desmontaje, fabricación de piezas y montaje. Por lo que el pliego se ha dividido en estos puntos.

-Desmontaje:

El desmontaje se debe realizar siguiendo el manual del fabricante, de forma que se facilite la extracción de cada pieza y al seguir un guion se facilita la clasificación y posterior montaje. Se debe clasificar todas las piezas que posteriormente se van a utilizar y apartar las piezas que no se utilizarán en el montaje.

Una vez desmontado el motor se deben limpiar todas las piezas y eliminar todo resto de juntas y adhesivos viejos.

Se deben verificar las piezas sometidas a desgaste o que presenten desperfecto, y en su caso repararlas o sustituirlas.

-Fabricación de piezas:

Todas las piezas se deben fabricar con el material y las medidas especificadas en los planos.

Los acabados de pieza deben ser lo mejor posible que permita el proceso de fabricación establecido, sobre todo en las zonas en que hay piezas en contacto con movimiento, de forma que se impidan fugas de compresión y problemas mecánicos. Al igual que el correcto acabado de las piezas permitirá el correcto montaje del motor.

-Montaje:

Para el correcto montaje del motor se deben seguir los pasos del manual del fabricante hasta que se llegue a la culata, momento en el cual se deben montar las piezas siguiendo el orden de:

-Junta cilindro-culatín.

-Culatín.

-Colocar el pistón en su posición más alta.

-Válvulas de admisión y escape, no es relevante cual se ponga antes. Colocar las válvulas de forma que la de escape esté a punto de cerrarse, le falten 16º para cerrarse, y la de admisión este abriéndose, este abierta 14º. En este caso debido a los engranajes utilizados los ángulos serán aproximados.

-Junta culatín-culata.

-Culata.

-Tornillos de culata.

-Rodamientos en su alojamiento de la culata

-Engranaje helicoidal mas eje en los rodamientos, con la parte del engranaje hacia el centro de la culata.

-Engranaje helicoidal de la válvula de escape, y colocar el tornillo que lo fija.

-Piñón superior, introducido y atornillado al eje del engranaje helicoidal. Pasar la cadena, que sube desde el cigüeñal, por el piñón y apretar el tensor de la cadena.

-Junta de las tapa de culata.

-Tapa culata.

El montaje de las piezas que van a estar en contacto con roce, se realizara con una pequeña cantidad de aceite para facilitar el montaje.

Se debe respetar los pares de apriete de los tornillos, indicado por el fabricante en el manual de taller de la Yamaha SR 250.

10.Presupuesto

En este apartado se compara el precio del modelo original en contraposición del nuevo diseño. Se compara las piezas con sus equivalentes o grupo de equivalente y se finaliza comparando el conjunto completo, de forma que se puede apreciar las diferencias entre las piezas originales y las nuevas.

Dado que es un punto importante a la hora de determinar si un proyecto es viable o no, para determinar la viabilidad de un proyecto hay que comparar el incremento o disminución del presupuesto del nuevo diseño con las ventajas o desventajas que provoca esta variación en el precio.

Se ha optado por comparar el precio de cada pieza según el coste del material y la cantidad utilizada, dado que algunos procesos son muy nuevos y no existen o no se han encontrado datos exactos del coste de producir piezas de estas características por medio de estos procesos. De igual manera esta comparación hace ver la diferencia de coste de entre los materiales utilizados en el diseño original y las nuevas piezas.

En la siguiente tabla se puede observar la comparativa entre piezas y el total del cada conjunto. El nuevo modelo es más caro, exactamente 115,02 €, debido a la utilización de materiales de mayor coste, los cuales también presentan mejores características, lo cual justifica en gran medida el incremento en el precio del conjunto.

Elemento Original	Original (€)	Elemento Modificado	Modificado (€)
Culata	8,10	Culatín	23,69
		Culata	95,18
		Tapa culata	1,32
Válvula de escape	0,03	Válvula de disco de escape	2,04
Muelles válvula escape	0,03		
Arandela cónica válvula de escape	0,01		
Válvula de admisión	0,04	Válvula de disco de admisión	1,63
Muelles válvula de admisión	0,03		
Arandela cónica válvula de admisión	0,01		
Balancines	0,54	Engranaje helicoidal válvula de escape	0,02
Árbol de levas	0,19	Engranaje helicoidal + eje	0,04

Tabla 68. Presupuesto (1/2)

Elemento Original	Original (€)	Elemento Modificado	Modificado (€)
Rodamientos	0,09	Rodamientos	0,02
Piñón superior	0,06	Piñón superior	0,03
Junta culata-cilindro	0,06	Junta culatín-cilindro	0,07
		Junta culatín-culata	0,10
		Junta tapa culata	0,10
Tornillos culata-cilindro (4 unidades)	0,18	Tornillos culata-cilindro (4 unidades)	0,15
Pistón	0,48	Pistón	0,48
Total	9,85	Total	124,87

Tabla 69.Presupuesto (2/2)

11. Maqueta

Una vez realizado el modelado 3D se ha procedido a la realización de una maqueta a tamaño real, partiendo de un motor de Yamaha SR 250, el cual se ha desmontado, limpiado y pintado todas las piezas. Los elementos del nuevo diseño se han fabricado con una impresora 3D, modelo PRUSA I3, comprada por piezas y ensamblada para este cometido, esto ha sido uno de los inconvenientes a la hora de realizar la maqueta, dado que previamente a la realización de la piezas, se ha tenido que ajustar y configurar muchos parámetros de la impresora y realizar infinidad de pruebas para que las piezas finales se hicieran con el mejor acabado y que cuadraran bien entre ellas y con las piezas originales del motor.

Una vez preparadas todas las piezas originales y fabricadas las nuevas, se ha procedido al ensamblaje de todas ellas, en lo que es el interior del cárter original se ha optado por no montar todas las piezas, de forma que se ha reducido el peso para facilitar el transporte del nuevo sistema, y por último se ha construido un soporte para la exposición del motor.

11.1. Proceso fabricación

En lo que respecta a la fabricación de las nuevas piezas, se ha optado por realizarlas con una impresora 3D de plásticos, se ha utilizado ABS y PLA según pieza, dado que es una maqueta y no un modelo funcional. En lo que concierne a las piezas más pequeñas no ha habido grandes problemas a la hora de imprimirlas.

En cuanto a las piezas más grandes, se ha optado por no realizarlas macizas, principalmente por el coste de material y tiempo. En estas piezas sí que ha habido grandes problemas de fallos con la pieza a mitad impresión, piezas que se han despegado de la base y un largo etcétera, la pieza más grande tardo más de un día en realizarse, por el hecho de reducir velocidades y variar algunos parámetros para evitar problemas en una pieza en la que se invertía tanto tiempo.

El hecho de utilizar PLA o ABS esta determinado en principio por la complejidad de la pieza, dado que cada material tiene unas propiedades, beneficiosas para unas cosas y perjudiciales para otras. Además, según las condiciones ambientales reaccionan de diferente manera los materiales, esto es debido a que la impresora es abierta y no se encuentra en una sala controlada ni nada parecido

En la primera imagen del apartado, se puede observar la impresora realizando la culata en ABS, se puede ver el relleno parcial de la pieza, de forma que se conserva la rigidez estructural de la pieza, pero se reduce el gasto de material y se reduce el tiempo de impresión.

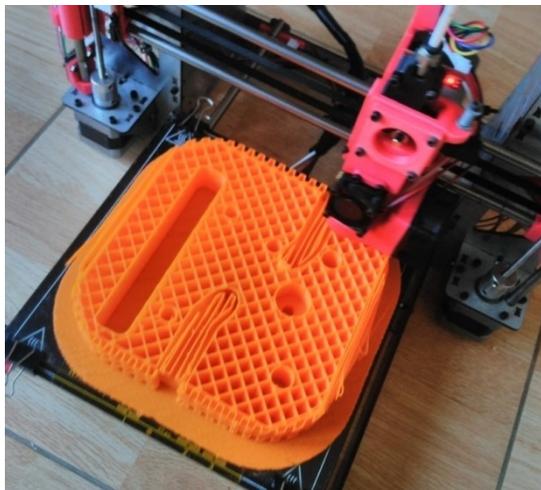


Figura 99. Culata en proceso de impresión.

Además de imprimir las piezas, se han reparado algunas imperfecciones fruto de problemas en la impresión y se han pintado para darles un aspecto más concorde con el motor. En la siguiente imagen se puede observar la culata acabada, reparada y pintada. En la tercera imagen, del apartado, se pueden observar todas las piezas impresas y pintadas.

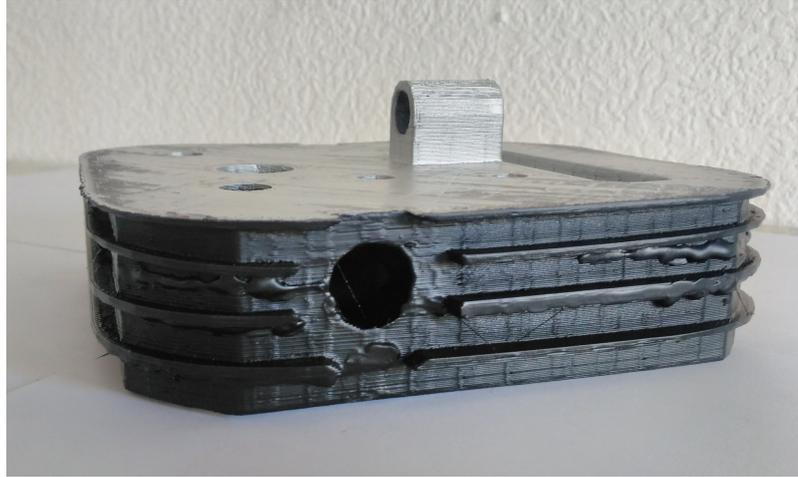


Figura 100. Culata acabada.



Figura 101. Elementos del nuevo sistema impresos en 3D.

Una de las partes más laboriosas de la realización de la maqueta ha sido el desmontaje completo del motor, dado que son necesarios algunos útiles de los que no se dispone, pero con algo de ingenio y en ocasiones fuerza se pudo desmontar todo. Una vez todo desmontado se optó por no volver a montar algunos elementos del interior del cárter, solo se han montado los necesarios para el montaje del nuevo sistema y que permita su movimiento a una velocidad muy reducida. Además, de esta forma se ha reducido en gran medida el peso, de forma que es más fácil de manejar y transportar. En las siguientes imágenes se puede observar el motor abierto y parcialmente desmontado.



Figura 102. Motor con cilindro y culata desmontados.



Figura 103. Motor abierto por el lado del embrague.

Una vez seleccionadas las piezas que se iban a utilizar para la maqueta, se limpiaron minuciosamente, dado que al funcionar con aceite y restos de suciedad del motor, durante muchos años, se encontraba todo muy sucio y en malas condiciones para poderse pintar y darle mejor imagen. Una vez todo limpio y desengrasado se aparejo y pinto cada pieza, de forma que se diferencia entre la parte interior y la exterior de cada elemento y una vez todo el conjunto montado, que da con una imagen limpia. En las siguientes imágenes se puede observar las tapas del cárter, imprimadas y después pintadas en plata el interior y en negro el exterior.



Figura 104. Cárters imprimados (a la izquierda), cárters pintados (a la derecha).

Una vez todo pintado se procedió al ensamblaje de todo el conjunto, piezas originales con las nuevas. En la siguiente imagen se pueden observar todas las piezas originales ensambladas y montadas sobre el soporte fabricado para el caso.



Figura 105. Piezas originales ensambladas.

Por último se ensamblaron las piezas nuevas fabricadas con la impresora 3D, algunas tuvieron que ser lijadas o perforadas de forma que ajustaran perfectamente entre ellas y con las originales, dado que la impresora tiene unos límites en lo que se refiere al acabado y en algunos puntos esto impedía un buen ajuste, o impedía el montaje, de algunas piezas. En las siguientes imágenes se observan las piezas ya montadas sobre el motor y se puede observar el acabado final una vez acabado.



Figura 106. Motor con el nuevo sistema, sin tapa superior.

En las últimas imágenes de este apartado, se puede observar el motor montado y compararlo con el modelo creado con el programa de modelado 3D. En las primeras imágenes se observa el motor sin la culata.

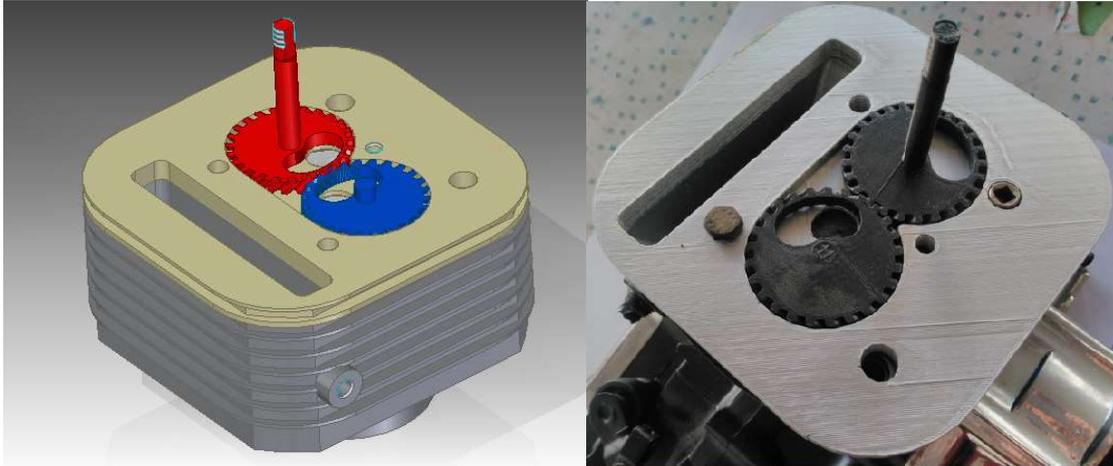


Figura 107. Motor digital (izquierda) y motor real (derecha) sin culata.

En las últimas dos imágenes se puede observar la maqueta completamente montada, a falta de la tapa superior, y compararla con la imagen del motor realizado en el programa 3D, en el que la culata es parcialmente invisible para poder apreciar las piezas y conductos que no se verían con una imagen solida. Se puede observar que se ha conseguido fabricar una maqueta muy fiel al diseño realizado en el programa, y esto permite apreciar cual sería el aspecto y dimensiones reales del motor una vez construido.

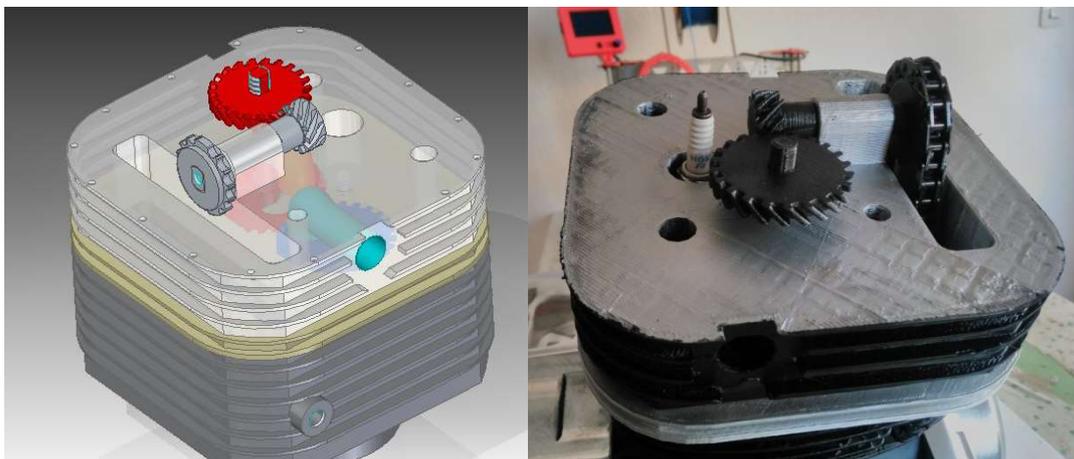


Figura 108. Motor con culata.

12. Conclusiones

Analizando los resultados obtenidos en este estudio, se determina que la fabricación y correcto funcionamiento del sistema de distribución planteado es viable. Dado que después del diseño, selección de material y proceso de fabricación se da por hecho que la fabricación de las piezas es posible, se debería profundizar más en la selección del material, dado que se ha escogido un material general, sin especificar la composición química exacta, lo cual se podría determinar realizando un estudio termodinámico del sistema y realizando ensayos con piezas reales fabricadas con variantes del material y también variando algunos puntos del elemento estudiado.

En lo que se refiere al diseño de cada pieza, podría variar en el caso de realizarse un estudio de flujo de entrada y salida de gases a la cámara de combustión, variando la geometría de forma que se optimizara el rendimiento. En este supuesto se ha diseñado una primera idea del sistema, de forma que se asegurara el funcionamiento y ajuste con el motor original.

Con las simulaciones sobre las piezas, ya diseñadas y con las características del material escogido, se ha determinado que resistirían el funcionamiento del motor y cumplirían su función aun durante los momentos de mayor exigencia mecánica.

Una vez terminado el estudio se observa que se cumplen los objetivos planteados al principio, se ha reducido el tamaño y el peso de todo el conjunto, se han reducido elementos con movimiento alternativo y se evita el choque del pistón con las válvulas.

El principal inconveniente que presenta este nuevo sistema es que al utilizar materiales de coste superior a los del sistema original se encarece la fabricación, pero esto produce varias ventajas para el funcionamiento del motor. Por lo que el hecho de que sea más caro no descartaría su fabricación, dado que si las mejoras compensan el sobrecoste, resultaría una opción viable. Para confirmar esta afirmación se debería realizar un estudio más detallado de un motor con este sistema y fabricar un modelo funcional y realizar las comprobaciones pertinentes.

Además de los objetivos planteados inicialmente, este nuevo sistema debería proporcionar un mejor rendimiento, por lo tanto una mayor potencia. Teniendo en cuenta la fisionomía, del nuevo motor, se podría aumentar el número de revoluciones del motor, dado que no existen problemas de flotado de válvulas, esto también incrementaría la potencia del motor. Otra ventaja es que al producirse un llenado más óptimo del cilindro, la combustión sería mejor y se reducirían los gases contaminantes expulsados por el motor.

12.1. Variantes

Este sistema es aplicable tanto a motores Otto como diesel, como a cualquier tipo de motor de combustión de constitución similar, incluso adaptándolo se podía adaptar a motores Wankel.

Para la adaptación hay que tener en cuenta que los motores diesel y los actuales gasolina, están provistos de inyección directa por lo que el inyector debe llegar hasta la cámara de combustión y habría que tenerlo en cuenta para el dimensionado y colocación de las válvulas.

También se podría optar por la colocación de cuatro válvulas por cilindro, tanto en diesel como gasolina, el modelo sería similar pero con válvulas más pequeñas para no tener que hacer la culata más ancha, que algunos casos, para conseguir mayores prestaciones puede que fuera necesario, pero eso habría que valorar que es más importante para el tipo de motor.

Otra posible variante sería la distribución variable, la cual se podría realizar con engranajes de geometría variable o realizando una transmisión entre válvulas por medio de una cadena con un tensor variable. De esta forma se conseguiría ajustar más lo tiempo de adelanto y retraso, de válvulas, al régimen del motor.

La variante más completa y con más ventajas sería una versión sin sistema de distribución físico. Se suprimirían todos los mecanismos que transmiten el mecanismo desde el cigüeñal hasta las válvulas, se montarían sensores en el motor para saber todos los parámetros necesarios y se instalaría un motor eléctrico en cada válvula, y por medio de una centralita que recibiera, las señales, y comandara, los motores de las válvulas, se sincronizaría el motor y se ajustarían los tiempos y cantidad de apertura de la válvula de forma que se ajustara, a la perfección, al régimen y parámetros del motor en cada momento de funcionamiento. Este montaje permitiría un mayor control del motor por lo que se podrían conseguir mejores rendimientos, más potencia, motores más lineales y menores consumos.

13. Bibliografía

-Libros

David Myszka. (2011). Maquinas y mecanismos. Pearson Educación de México, S.A. de C.V.

González Calleja. (2011). Motores. Ediciones Paraninfo, S.A.

Hegger, M., Drexler, H., & Zeumer, M. (2010). Materiales. Barcelona: Gustavo Gili.

Sanz Acebes, S. (2011). Motores. Madrid: Editex.

-Webs

ARPEM.com - tipos de junta de culata y materiales -. (2018). Obtenido de http://www.arpem.com/tecnica/coches/pyr/coches_00028.html

Artesanía en el campo de Gibraltar. (2018). Obtenido de [https://www.eyeonspain.com/blogs/josemanuel/4498/forja-\(definici%C3%B3n\).aspx](https://www.eyeonspain.com/blogs/josemanuel/4498/forja-(definici%C3%B3n).aspx)

ASI FUNCIONA EL MOTOR DE GASOLINA. (2018). Obtenido de http://www.asifunciona.com/mecanica/af_motor_gasolina/af_motor_gasolina_5.htm

Asysum. (2018). Obtenido de <http://www.asysum.com>

Bloque del motor - EcuRed. (2018). Obtenido de https://www.ecured.cu/Bloque_del_motor

Caja de cambios -tipo, definición y explicación-. (2018). Obtenido de <https://diccionario.motorgiga.com/diccionario/caja-de-cambios-tipo-definicion-y-explicacion/gmx-niv15-con194805.htm>

Cerámica estructural del Nitruro de Silicio | Textos Científicos. (2018). Obtenido de <https://www.textoscientificos.com/quimica/ceramicas-avanzadas/nitruro-silicio>

Cerámicas: Fabricación de materiales cerámicos | Carbosystem. (2018). Obtenido de <http://carbosystem.com/ceramicas/>

Ciclo Otto. (2018). Obtenido de http://laplace.us.es/wiki/index.php/Ciclo_Otto

CULATA - Definición - Significado. (2018). Obtenido de <http://diccionario.motorgiga.com/diccionario/culata-definicion-significado/gmx-niv15-con193756.htm>

DEMO E-DUCATIVA CATEDU. (2018). Obtenido de <http://e-educativa.catedu.es>

Engine Management Technology: Kawasaki Technology: Kawasaki Motorcycle & Engine Company. (2018). Obtenido de https://www.kawasaki-cp.khi.co.jp/technology/engine/tech_dualthrottlevalves_e.html

Fastener Facts - Engine Builder Magazine. (2018). Obtenido de <http://www.enginebuildermag.com/2008/09/fastener-facts/>

Inyección aglutinante, te lo contamos todo! - 3Dnatives. (2018). Obtenido de <http://www.3dnatives.com/es/inyeccion-aglutinante-te-lo-contamos-23032016/>

MATERIALES PARA LA CONSTRUCCION DE ENGRANAJES. (2018). Obtenido de https://prezi.com/er_jsiw0sgs8/materiales-para-la-construccion-de-engranajes/

Metalurgia de Polvos (Prensado y Sinterizado). (2018). Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/157967461/Metalurgia-de-Polvos-Prensado-y-Sinterizado>

NL, N., NL, N., NL, N., NL, N., NL, N., & NL, N. et al. (2018). ELECTROTECNIA Y MECANICA. Obtenido de <http://laspalmastecnologica.blogspot.com.es>

Rotary-Valve Internal Combustion Engines. Mechanical Engineering Programs. (2018). Obtenido de <http://www.douglas-self.com/MUSEUM/POWER/unusualCeng/RotaryValveIC/RotaryValveIC.htm>

Toyocosta.com: TOYOCOSTA | Concesionario de Toyota en Guayaquil. (2018). Obtenido de <https://www.easycounter.com/report/toyocosta.com>

Transmisiones por Engranajes. (2018). Obtenido de <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn151.html>

Virtual, T. (2018). La culata... elemento esencial. Obtenido de <http://www.actualidadmotor.com/la-culata-elemento-esencial/>