

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

**“DISEÑO, ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE UN
MOTOR STIRLING Y UN MOTOR DE CUATRO
TIEMPOS”**

Autor: Jorge Sayago Tinoco

Tutores: María Gloria del Rio Cidoncha

Juan Martínez Palacios



Departamento de Ingeniería Gráfica

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Aeroespacial

**“Diseño, análisis y comparación de un motor
Stirling y un motor de cuatro tiempos”**

Autor:
Jorge Sayago Tinoco

Tutor:
María Gloria del Río Cidoncha

Juan Martínez Palacios

Departamento de Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021

Trabajo Fin de Grado: “Diseño, análisis y comparación de un motor Stirling y un motor de cuatro tiempos”

Autor: Jorge Sayago Tinoco

Tutor: María Gloria del Río Cidoncha y Juan Martínez Palacios

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

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecerle a mis tutores, María Gloria del Rio Cidoncha y Juan Martínez Palacios, el haberme dado la oportunidad de realizar este trabajo junto a ellos, así como por toda la ayuda y los consejos que me han proporcionado a cada paso del camino, y por toda la paciencia que han tenido conmigo.

También, por supuesto, quiero darle las gracias a mi familia.

A mis padres, por su apoyo incondicional que me han brindado, no solo durante la carrera, sino en todos los aspectos de la vida. Han sido el pilar fundamental que me ha sujetado todos estos años, y la principal razón para no rendirme frente a las adversidades y haber seguido adelante hasta el final

Y especialmente quiero darle las gracias a mi hermano Manuel, que ha seguido mis pasos en la ingeniería, y que es, con diferencia, la persona de la que más orgulloso me siento. Mi mayor objetivo en la vida ha sido siempre aspirar ser un referente y un ejemplo a seguir para él, para que también pueda decir que se siente orgulloso de su hermano mayor.

Finalmente quiero darle también las gracias a Jesús, Carlos y Antonio, a mis amigas Elena y Maribel, y a mis compañeros Álvaro y Damián, por haber compartido este arduo camino conmigo, y, sobre todo, por haberme brindado su amistad.

A todas estas personas que me han apoyado incondicionalmente, gracias de corazón. Solo espero poder devolverles todo el cariño que me han ofrecido en igual medida, y hacer que se sientan orgullosas y felices de que esté en sus vidas.

Jorge Sayago Tinoco

RESUMEN

En el presente Trabajo de Fin de Grado se pretende realizar el diseño y análisis de un motor de tipo Stirling y de un motor de combustión interna de cuatro tiempos, el motor Webster.

En este texto se persigue, por tanto, un doble objetivo: en primer lugar, mostrar las potentes características de los programas de diseño asistido por ordenador, en este caso, el software CATIA, en su versión V5R19, siendo justamente el apartado de diseño el principal enfoque del trabajo; en segundo lugar, como objetivo principal, este Trabajo aspira a funcionar como un repositorio de las principales características de los motores anteriormente mencionados. En ese sentido, se procurará ofrecer una información extensa y completa acerca de estas máquinas, no sólo ateniéndose a su diseño estructural, sino también a su desarrollo histórico, funcionamiento, termodinámica y aplicaciones.

La elección de estos dos motores se ha basado, primero, en ofrecer una comparativa interesante entre dos máquinas que, si bien pertenecen al mismo campo de la ingeniería y aspiran a desempeñar las mismas funciones, son sustancialmente diferentes en su funcionamiento y capacidades, lo que permitirá poner fácilmente de manifiesto sus fortalezas y debilidades al compararlas entre ellas. En segundo lugar, un motivo de gran interés para seleccionar esta pareja de motores ha consistido en el hecho de que ambos utilizan gas como principal fluido de funcionamiento; esto es algo revolucionario en la industria del motor, y abre la puerta a un desarrollo más sostenible de este sector, un objetivo que se ha venido buscando desde hace mucho tiempo, siempre opacado por el dominio de los combustibles fósiles.

Así pues, para la realización de esta tesis, se procederá a desarrollar una reseña histórica de ambos motores, tras lo cual se hará una introducción a los programas de diseño por ordenador que se emplearán para su modelado (CATIA y Keyshot). A continuación, se mostrará el propio modelado, que ejercerá como la parte central de este Trabajo, para posteriormente desgranar el funcionamiento de ambos motores, así como la termodinámica que siguen. El texto concluirá con un apartado de conclusiones, que enumerará las ventajas y desventajas de cada motor, y establecerá una comparativa entre sus capacidades y características.

ABSTRACT

In this text we will develop the design and further analysis of a Stirling engine and a 4-Stroke, Internal Combustion engine, namely the Webster Engine.

Furthermore, a double objective is chasen: in the first place, we would like to show the magnificent capabilities and characteristics of the computer-aided design tools and softwares we will be using, being the most relevant the CATIA software, specifically on his V5R19 version. Thus, the design section will be the main focus of this text. However, the second and most important objective of this End-Of-Degree Project is offering a mostly complete overview of these two engines, making this paper useful as a guide for understanding how do they work, and their general characteristics. This means we will not restrain ourselves to the design section; information about their historical development, functioning, thermodynamics and applications will be also found here.

About the reasons of selecting specifically this pair of engines, we can find two answers for that question. In the first place, they offer an interesting comparison, since both of them belong to the same area of engineering, and they are designed to be close competitors, but incidentally, the principles under they work and their general characteristics are quite different. On the second hand, one of the most interesting reasos for selecting these engines relies on the fact that both of them employ gas as their main working fluid; this is something revolutionary in the engine industry, and it marks the beginning of an era in which more ecological and sustanaible sources of energy become a solid option against the historical dominance of fossil fuels.

Thus, we will start this tesis by making a review of the development of these two kinds of engines along the years, followed by an introduction of the softwares which will be used for the design and modeling (CATIA and Keyshot). Then we will show the main chapter of this text: the desing and modeling section. The following chapters will cover the aspects of the internal functioning of the engines, along with a study about the thermodynamics they follow. We will conclude this End-Of-Degree Project with a chapter in which we will show the advantages and disadvantages of each engine, and we will remark the conclussions reached along the text.

Índice

Agradecimientos	7
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
1. - INTRODUCCIÓN.....	15
2. - RESEÑA HISTÓRICA	16
2.1. - Reseña histórica del Motor Stirling.....	16
2.2. - Reseña histórica del Motor de Combustión Interna.....	20
3. - SOFTWARE	29
3.1. - CATIA.....	29
3.1.1. - SOBRE CATIA	29
3.1.2. - HERRAMIENTAS DE CATIA.....	30
3.2. - Keyshot.....	44
3.2.1. - SOBRE KEYSHOT	44
3.2.2. – HERRAMIENTAS DE KEYSHOT.....	45
4. - MODELADO	51
4.1. – Motor Stirling	52
4.1.1. - BASE	52
4.1.2. - SOPORTE DE FUENTE DE CALOR	54
4.1.3. - TORRE DE TRANSMISIÓN	56
4.1.4. - VOLANTE DE INERCIA.....	60
4.1.5. - CILINDRO PRINCIPAL	63
4.1.6. - MOTOR STIRLING	66
4.2. - Motor Webster	68
4.2.1. – BASE.....	69

4.2.2. - CILINDRO PRINCIPAL	72
4.2.3. – PISTÓN	75
4.2.4. - CAJA DE VÁLVULAS.....	77
4.2.5. - CONJUNTO DE RUEDA Y ENGRANAJES.....	86
4.2.6. - PIEZAS FINALES.....	92
4.2.7. - MOTOR WEBSTER	94
5. – FUNCIONAMIENTO Y CICLOS.....	98
5.1. - Motor Stirling	98
5.1.1. - DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO.....	98
5.1.2. - CICLO STIRLING	102
5.2. - Motor Webster	105
5.2.1. - DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO.....	105
5.2.2. - CICLO OTTO	110
6. - CONCLUSIONES	113
6.1. - Motor Stirling	113
6.1.1. - VENTAJAS	113
6.1.2. - DESVENTAJAS	114
6.1.3. - APLICACIONES Y DESARROLLO FUTURO	115
6.2. - Motor Webster	117
6.2.1. - VENTAJAS	117
6.2.2. - DESVENTAJAS	118
6.2.3. - APLICACIONES Y DESARROLLO FUTURO	119
6.3. - Conclusiones	120
7. - ANEXOS	123
7.1. - Bibliografía	124
7.2. - Índice de imágenes	131
7.3. - Planos	135

1. - INTRODUCCIÓN

El objetivo principal del presente texto será realizar un análisis pormenorizado de dos tipos diferentes de motores: el motor Stirling y el motor Webster, un motor de categoría de combustión interna de cuatro tiempos.

El principal enfoque de este Trabajo se centrará en el aspecto del diseño de ambos motores. Así, partiendo de unos planos dimensionados, se utilizará el software de diseño asistido por ordenador CATIA, en su versión V5R19, para realizar el modelado de las diferentes piezas que componen ambos motores, así como su posterior unión y montaje. Una vez se haya realizado este objetivo, se procederá a realizar un renderizado de las piezas obtenidas, así como de su conjunto ensamblado, con el software Keyshot. En aras de ampliar los conocimientos que el presente Trabajo puede aportar, así como para aportar una base sólida y un mejor entendimiento de los procedimientos seguidos, se realizará previamente un breve estudio de los dos softwares mencionados, así como de las principales herramientas internas que se han utilizado para la realización de ambos diseños.

Si bien ha quedado estipulado que la idea central de este Trabajo de Fin de Grado se enfoca en el diseño de los motores, se ha pretendido ir un paso más allá, haciendo de este texto un estudio completo de estos. De esta forma, este documento sirve como un análisis en profundidad, que permite hacerse una idea completa de las características que presentan estos motores.

Así, este texto incluye también una reseña histórica de ambos motores, lo cual permite poner en contexto los antecedentes, la creación y el desarrollo de estas máquinas.

También, considerado como algo imprescindible en un documento que versa sobre máquinas funcionales, como lo son una pareja de motores, se ha analizado en profundidad el funcionamiento intrínseco de los motores Stirling y de los motores de combustión interna de cuatro tiempos, para luego establecer las equivalencias con los motores específicos que se han diseñado aquí. Este apartado también incluye un estudio sobre los ciclos termodinámicos seguidos por ambos motores, indispensable para alcanzar un entendimiento de las capacidades energéticas de estos.

Finalmente, el último apartado, de gran interés y relevancia, consiste en una comparación entre ambos motores, desgranando sus ventajas e inconvenientes, y la conveniencia de uno sobre el otro. Este punto habla sobre la motivación última de haber seleccionado estos dos motores; allí donde el motor de combustión interna es un motor clásico, con gran historia, desarrollo y trasfondo detrás, cuyas aptitudes han sido ampliamente estudiadas (si bien aún tiene un amplio margen de mejora e innovación, especialmente con la incorporación de los nuevos combustibles gaseosos, como es el caso del motor Webster que se presenta aquí), el motor Stirling se presenta como una opción mayormente desconocida para el público, pero con unas interesantes capacidades y utilidades que lo hacen digno de estudio y análisis.

2. - RESEÑA HISTÓRICA

En el presente apartado se procederá a realizar una reseña histórica de los motores sobre los que versa este Trabajo. Se ha considerado que es procedente realizar este estudio, puesto que nos permitirá alcanzar una mejor comprensión de estos motores, al conocer así sus antecedentes y las motivaciones de su creación, así como las posibilidades que ofrecen y el futuro que se les presenta.

2.1. - Reseña histórica del Motor Stirling

El motor Stirling fue inventado y patentado por el reverendo e ingeniero Robert Stirling en 1816 [1]. La idea de su creación surgió como una continuación de anteriores intentos, en su mayoría infructuosos, por crear un motor impulsado por aire.

Los principales casos anteriores registrados por crear un motor de esta metodología fueron los intentos, en primer lugar, de Guillaume Amontons, siendo el primero en crear un motor de aire caliente funcional, en 1699 [2]. Este motor sería un precursor de los trabajos de Robert Stirling, siguiendo unas pautas cercanas a lo que más tarde el reverendo escocés definiría como el propio ciclo Stirling [3]. Este motor original utilizaba un sistema de agua como sustituto del sistema de pistón que incorporaría Stirling, y se basaba en una rueda rotatoria, sin introducir aun el movimiento de avance alternativo que caracteriza a nuestro motor bajo estudio. Si bien este motor, al parecer, podía alcanzar unas potencias no desdeñables para la época, la dificultad de su diseño, así como el escaso rango de aplicaciones a las que podía incorporarse, hizo que no supusiera una revolución en sí mismo.

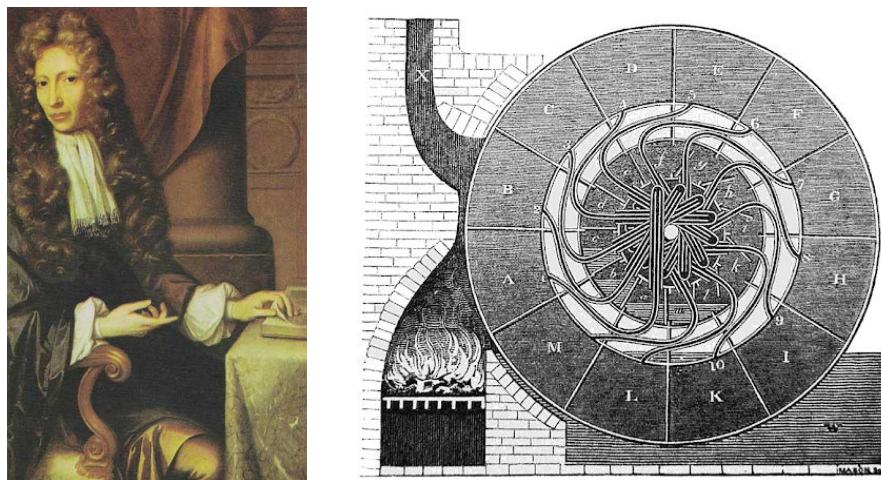


Ilustración 2.1: Guillaume Amontons (izda) [4] y diseño de su primer motor de aire caliente (dcha) [2]

El trabajo de Amontons en este campo fue continuado en 1807 por George Cayley, que también creó un sucedáneo del motor de aire caliente. Aunque solucionaba varias de las problemáticas del modelo de Amontons, aún distaba de ser un diseño al que se le pudiera encontrar utilidad práctica, y con algunas fallas que no lo hacían competitivo. Una de estas características negativas consistía en que el aire debía ser aportado continuamente desde el exterior para ser quemado y expandido en grandes cantidades, necesarias para mantener la combustión [5]. El diseño de Stirling solucionaría ampliamente este escollo, al tratarse de un motor en ciclo cerrado, con una cantidad de aire interna que se mantendría constante, sin necesidad de aportaciones posteriores para mantener el funcionamiento.

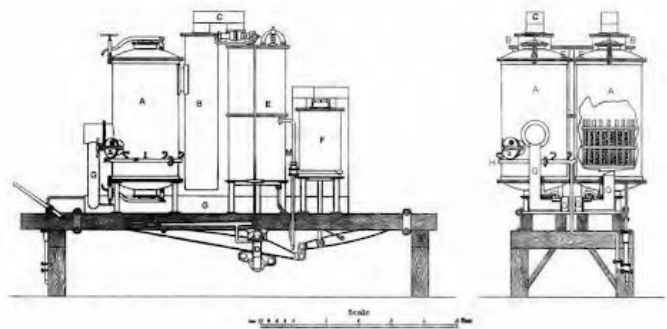


Ilustración 2.2: George Cayley (izda) [6] y su motor de aire caliente (dcha) [7]

Sin embargo, la llegada del motor Stirling sí fue revolucionaria, al ser el primero de este tipo de motores en encontrar aplicaciones prácticas; está registrado su primer uso oficial en 1818, cuando fue utilizado para bombear agua en las instalaciones de una cantera [3]. La capacidad del motor, con su capacidad generadora de energía, así como el alto aprovechamiento del trabajo producido lo popularizó rápidamente.

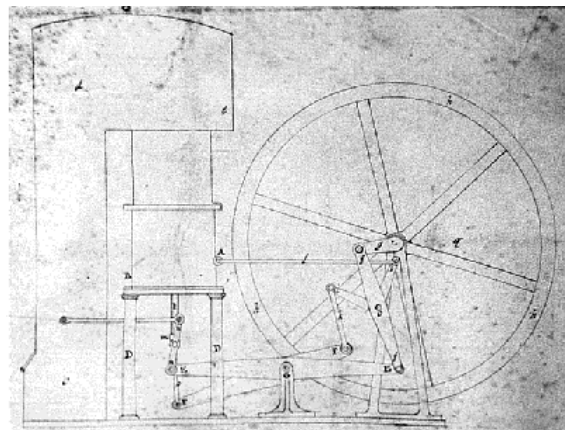
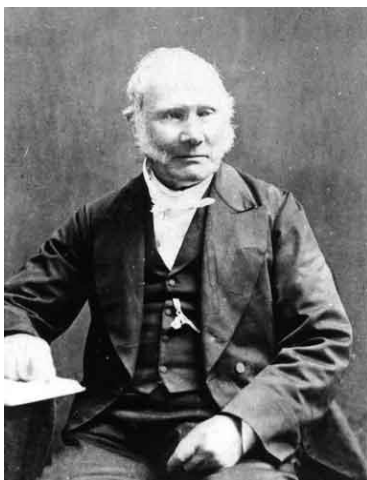


Ilustración 2.3: Robert Stirling (izda) [8] y Planos preliminares del motor Stirling (dcha) [9]

Desde su primer diseño, Robert Stirling, apoyado por su hermano e ingeniero James Stirling, continuó sacando patentes para el motor, con sucesivas mejoras y nuevas configuraciones para el motor. Dos de las principales motivaciones de los ingenieros a la hora de desarrollar este motor consistían, por un lado, en el evidente ahorro de combustible que se obtiene al sustituir los carburantes convencionales por aire; pero también, y principalmente, por la extraordinaria reducción en el riesgo de accidentes, y en el caso de ocurrir estos, en la menor gravedad de los daños acaecidos [10]. Esto presentaba una ventaja sustancial frente a los motores de vapor que poblaban la mayoría de las industrias de la época, y de los que no resultaba raro la noticia de que alguno hubiera explotado, con aparatosas consecuencias.

Para 1843, se tiene constancia de que los motores Stirling han sido ampliamente adoptados en muchas factorías, siendo un ejemplo registrado las fundiciones de hierro en Dundee, Escocia [11].

Sin embargo, y como se verá más adelante en el presente Trabajo, los motores Stirling deben trabajar a altísimas temperaturas; esto podía ser extremadamente limitante para los materiales de fabricación de la época, que en muchos casos no eran capaces de resistir de manera continuada el excesivo desgaste que esto suponía. Los motores Stirling anteriormente mencionados de las fundiciones de Dundee fueron reemplazados por motores de vapor al cabo de varios años, después de que los Stirling se quebraran en más de una ocasión [12]. A pesar de que seguía siendo una certeza la mayor seguridad de estos, ya que, en el caso de fallo, las consecuencias eran menores, el alto coste añadido del mantenimiento acabó por hacerlo prohibitivos.

Después del contratiempo de los motores de Dundee, no hay registros de que los hermanos Stirling continuaran con un desarrollo avezado de los motores patentados, los cuales además se vieron cada vez más arrinconados por los motores de vapor, los cuales se estaban volviendo más seguros y eficientes; las dos principales categorías en las que habían tratado de competir los motores Stirling originalmente. Sin embargo, se tiene constancia de que alrededor de 1860 estos pudieron volver a encontrarse en cantidades sustanciales, utilizados en aplicaciones que requirieran una potencia media-baja, como el bombeo de agua a baja escala [12]. En este tipo de operaciones trabajaban a temperaturas bastante más bajas de aquellas para las que habían sido ideadas en un principio; esto permitía que el desgaste que incurría sobre las piezas fuese mucho más bajo, aunque ciertamente trabajaban muy por debajo de su eficiencia ideal, solo alcanzable a altas temperaturas. El gran atractivo que mostraron para el público consistió en su alta seguridad, combinado con el hecho de que podían ser operados por cualquiera, incluso sin una formación sólida, ya que simplemente requerían un aporte de calor, fuese cual fuese la fuente [12]. Después de este breve auge, los motores Stirling volvieron a caer progresivamente en desuso, con pocos tipos en producción, y sin ningún desarrollo digno de mención, aparte de alguna mejora mecánica puntual, por lo que su diseño quedó estancado. Esto se acrecentó con la llegada de los motores

eléctricos y los motores de combustión interna, que acabaron por relegar completamente a los motores Stirling [12].



Ilustración 2.4: Motor Philips MP1002CA Stirling [15]

Sin embargo, en torno a 1930, la compañía Philips cobra interés por este tipo de motores, dentro de una campaña para expandir sus ventas a partes del mundo donde la electricidad y otras fuentes de energía modernas fueran un bien escaso. Tras un estudio por parte de los ingenieros de la compañía, el motor

Stirling se reveló como la gran opción para lanzar esta campaña, destacando sus bajos niveles de ruido e interferencias, ya fueran de radio o eléctricas, y, sobre todo, su versátil capacidad para funcionar con cualquier tipo de fuente de calor externa. Esto permitía que incluso en partes del mundo menos desarrolladas, hacer funcionar un motor Stirling fuera una tarea sencilla, pudiéndose quemar cualquier tipo de combustible barato [13]. Además, un gran punto a favor consistió en que el motor Stirling apenas había tenido desarrollo desde sus últimas iteraciones, por lo que se esperaba que, aplicando las nuevas técnicas y materiales disponibles de la época, podría conseguirse un salto extraordinario en sus capacidades y eficiencia [14].

Esto permitió, por lo tanto, un avance sustancial en el desarrollo del motor Stirling. Se crearon numerosos modelos con capacidades de generación de energía mejoradas, y muchos fueron derivados a universidades, donde empezaron a estudiarse las bondades de este motor. Una de las aplicaciones más interesantes encontradas fue la de un motor Stirling reverso con capacidad de criogenización. Este nuevo auge se mantuvo hasta la década de 1970, momento hasta el cual mantuvieron una fuerte presencia, aunque posteriormente, durante los siguientes 20 años aproximadamente, volvieron a cobrar un papel más discreto [13].

Sin embargo, vuelven a encontrar un resurgimiento sorpresivo en 1996, cuando la armada sueca fabrica tres submarinos de clase Gotland, los cuales, aunque trabajan con motores diésel mientras permanecen en la superficie, pasan a funcionar con motores Stirling en el momento de la inmersión, quemando combustible diésel alimentado con oxígeno líquido [16]. Más tarde Suecia volvió a utilizarlos para sus submarinos de clase Södermanland, y viendo el tremendo potencial que representan para esta aplicación, Japón también solicitó la incorporación de estos motores en todos sus nuevos submarinos.



Ilustración 2.5: Submarino clase Gotland [97]



Ilustración 2.6: Motor Stirling de tipo disco solar [18]

Finalmente, y en consonancia con las características de escasa contaminación que representa el motor Stirling, en los últimos años una de sus mayores incorporaciones ha sido en la industria de la producción de energía por alimentación solar, siendo la United Sun Systems una de las compañías que mayores avances ha logrado en la incorporación de estos motores en sus sistemas de alimentación [17].

2.2. - Reseña histórica del Motor de Combustión Interna

Procederemos a continuación con la reseña histórica del motor Webster, enfocada principalmente sobre el desarrollo de los motores de combustión interna dentro de los cuales se clasifica este. Hay que reseñar que, mientras el motor Stirling fue más autocontenido, pues se basó en una idea más atípica y revolucionaria, los motores de combustión interna tienen una historia larga y profunda, con un enorme número de avances e inventores conformando una idea que se desarrolló durante siglos.

Efectivamente, aún de forma anecdótica, se pueden encontrar primeros ejemplos de aprovechamiento de la combustión para el movimiento de maquinaria incluso en la antigüedad; uno de los ejemplos más claros consistiendo en las primeras aplicaciones de la pólvora desarrollados en la antigua China [19].

Sin embargo, no encontramos un desarrollo específico de la técnica orientada a ser incorporada en máquinas motor hasta el siglo XVII, momento el que Christiaan Huygens desarrolla una suerte de primer motor, empleando la combustión de pólvora en un contenedor cerrado para bombear agua [21]. Esta sería la primera aparición de una aproximación a la idea de un motor de combustión interna.

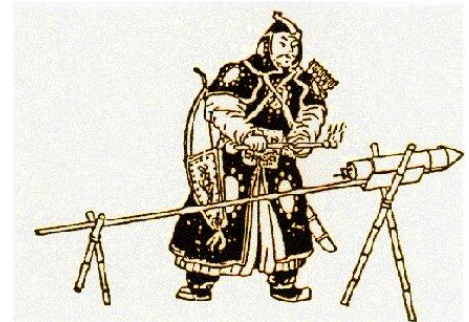


Ilustración 2.7: Primeras ilustraciones del uso de pólvora [20]

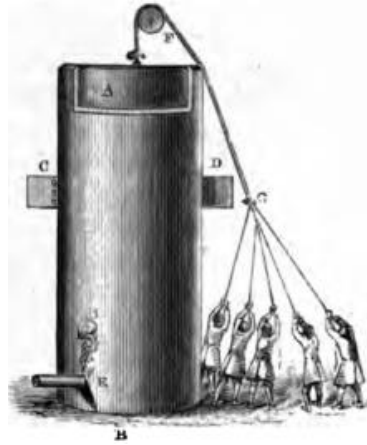


Ilustración 2.8: Christiaan Huygens (izda) [22] y una ilustración de su motor de pólvora (dcha) [23]

Su trabajo sería continuado por Denis Papin, el cual introduciría un cambio primordial: sustituiría el aire generado en la combustión por vapor de agua, creando así lo que sería un precursor de la máquina de vapor [24].

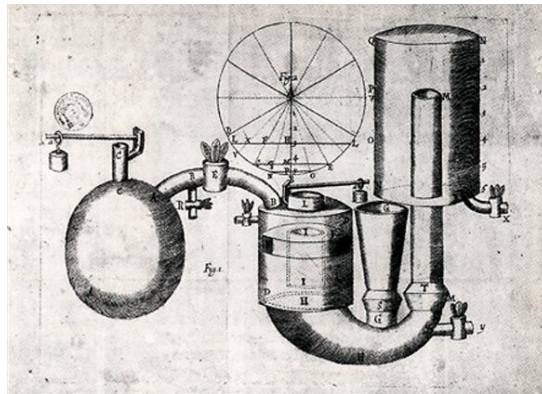


Ilustración 2.9: Denis Papin (izda) y una ilustración de su motor de vapor de agua (dcha) [25]

Durante los años posteriores se crearían un gran número de aproximaciones que girarían en torno a la idea de conseguir potencia mediante la quema de algún combustible en el interior de la maquinaria; también empezó a experimentarse con las ideas de válvulas y turbinas. No obstante, no es hasta 1807 cuando los hermanos Nicéphore y Claude Niépce inventaron el que podría considerarse como uno de los primeros motores oficiales de combustión interna. Utilizando una mezcla de residuos naturales, carbón y resina como combustible, idearon una máquina cuyo principio activo se basaba en la expansión de gas contenido en su interior para accionar sus piezas móviles, tras ser sometido a una explosión; idea básica que coincide en esencia con lo que se considera hoy día como un motor de combustión interna. Este primer motor fue bautizado como el “Pyréolophore” [26], y demostró su capacidad siendo capaz de hacer avanzar un pequeño barco por el río Senna. Sin embargo, las dificultades que involucraba el

combustible utilizado, junto con problemas de eficiencia y las escasas aplicaciones que se le encontraron, hicieron que tuviera un éxito relativamente bajo.

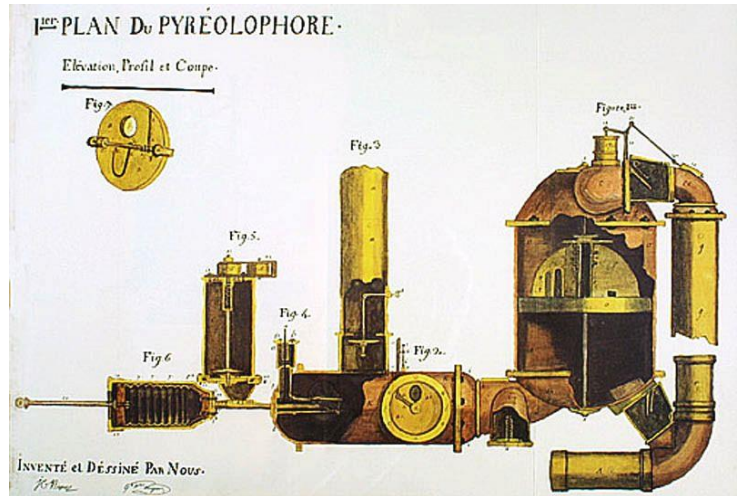


Ilustración 2.10: Nicéphore Niépce (izda) [27] y su invento, el Pyréolophore (dcha) [26]

En 1823 encontramos el siguiente gran avance, de la mano de Samuel Brown, que fue posteriormente encumbrado como “el padre del motor de gas”, el cual creó el primer motor de clasificación de combustión interna que fue aplicado industrialmente. Este, acorde con el título que recibió su inventor, funcionaba mediante el impulso de aire, combinado con la creación de vacío [28]. Samuel Brown siguió desarrollando su motor en los años siguientes, aunque, a pesar de que se reconoció el éxito de su idea, los altos costes involucrados en el motor impidieron que este pudiera ser ampliamente adoptado.

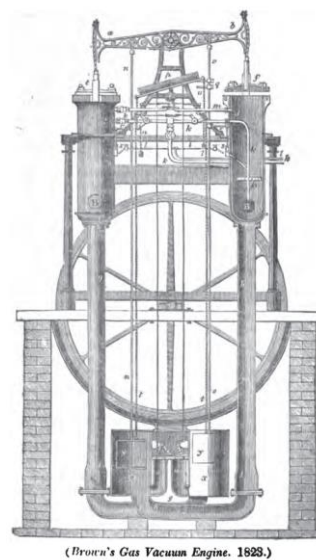


Ilustración 2.11: Samuel Brown (izda) y su motor de vacío (dcha) [29]

Debe reseñarse que, junto con la creación de nuevos motores, el estudio de la termodinámica que estos seguían discurría paralelo. Se establecía así una relación simbiótica entre los ingenieros desarrolladores y los científicos, en la que las aportaciones y descubrimientos de unos apoyaban, facilitaban, y en muchos casos, posibilitaban, las ideas del otro grupo. Es digno de mención la aportación de Sadi Carnot en 1824, que estableció el principio teórico de la termodinámica involucrada en los motores térmicos idealizados. Esto es especialmente relevante, pues fue de aquí de donde surgió el famoso ciclo de Carnot, que establece la eficiencia máxima que puede alcanzar un motor térmico.



Ilustración 2.12: Sadi Carnot [26]

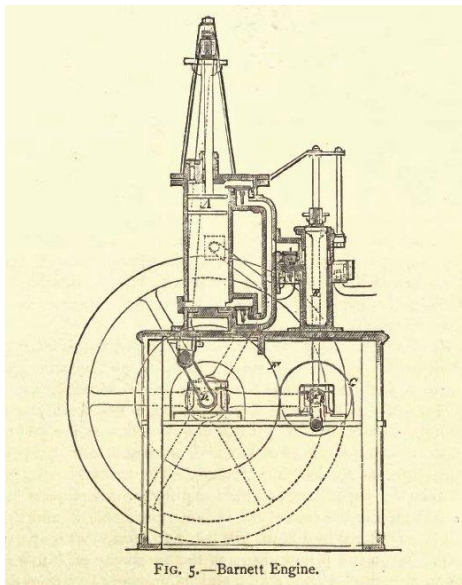


FIG. 5.—Barnett Engine.

Ilustración 2.13: Motor de William Barnett [30]

Durante los años siguientes se siguieron desarrollando nuevas ideas en este campo, aunque la mayoría se encontraban ante el muro insalvable de suponer costes demasiado elevados para una eficiencia muy reducida. Los trabajos de Carnot ya anunciaron en su momento que, para conseguir el aumento de eficiencia requerida, debía añadirse una fase de compresión al ciclo seguido por el motor; esta idea fue implementada con éxito por primera vez en 1838 por William Barnett, cuya creación es la primera que de forma oficial implementa una fase de compresión [30]. Esto supone un avance más hacia el motor de combustión interna por excelencia que se conoce hoy en día.

Entre 1853 y 1857, los italianos Eugenio Barsanti y Felice Matteucci desarrollaron un nuevo motor de combustión interna, implementando numerosos avances conseguidos en los últimos años [31]. Si bien en el momento no tuvieron una repercusión extraordinaria, los registros aseveran que su creación se contó entre los primeros motores capaces de competir en potencia con los afamados motores de vapor de la época.

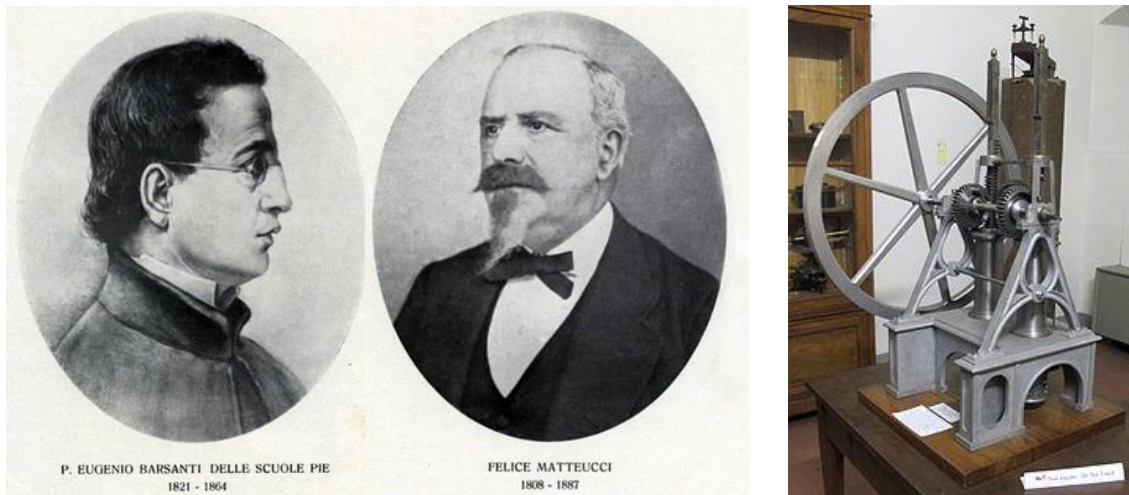


Ilustración 2.14: Eugenio Barsanti y Felipe Matteucci (izda) y modelo de su motor conjunto (dcha) [31]

En 1860 Jean Joseph Etienne Lenoir desarrolla el primer motor de combustión interna en ser considerado un éxito comercial, del cual se vendieron numerosas unidades, implementándose muchos de ellos en prototipos de automóviles [32]. Sin embargo, su escaso rendimiento impide su asentamiento generalizado.

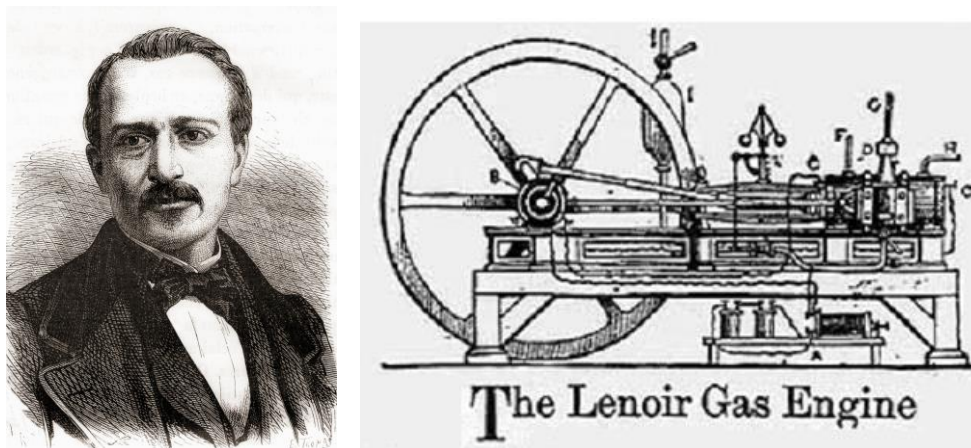


Ilustración 2.15: Jean Joseph Etienne Lenoir (izda) y su motor de combustión interna (dcha) [33]

Sin embargo, encontramos otro gran salto cualitativo en 1861, cuando Alphonse Beau de Rochas enuncia por primera vez el principio de funcionamiento del sistema de cuatro tiempos que sería adoptado por los motores de combustión interna modernos, además de enfatizar la importancia de la fase de compresión que ya había empezado a vislumbrarse recientemente [32].



Ilustración 2.16: Alphonse Beau de Rochas [34]

Paralelamente a Rochas, aunque superando ampliamente el alcance las creaciones de este, nos encontramos con Nikolaus Otto, el cual desarrolló exitosamente un motor de combustión interna que sería el precursor oficial, casi de similares características, a los motores modernos de esa categoría. Inició su trabajo basándose en el motor creado por Etienne Lenoir, corrigiendo sus fallas, e introduciendo todas las mejoras que pudo considerar, incluyendo el sistema de cuatro tiempos, que desarrolló por su cuenta de forma independiente a Rochas [32], [35]. En definitiva, Nikolaus Otto creó el primer ejemplo absoluto de un motor de combustión interna de cuatro tiempos, como aquel sobre el que versa el presente Trabajo. Así mismo, su motor hizo oficial el ciclo de



Ilustración 2.17: Nikolaus Otto [36]

funcionamiento termodinámico sobre el que trabajan estos motores, y al que le cedió su nombre: el ampliamente conocido ciclo Otto, bautizado de forma oficial en 1876 [35]. El motor de Otto fue un éxito comercial, y en 1864, junto con Eugen Langen, fundan la primera compañía productora de motores de combustión interna, que cobraría el nombre de la Deutz Gasmotorenfabrik AG (The Deutz Gas Engine Manufacturing Company).

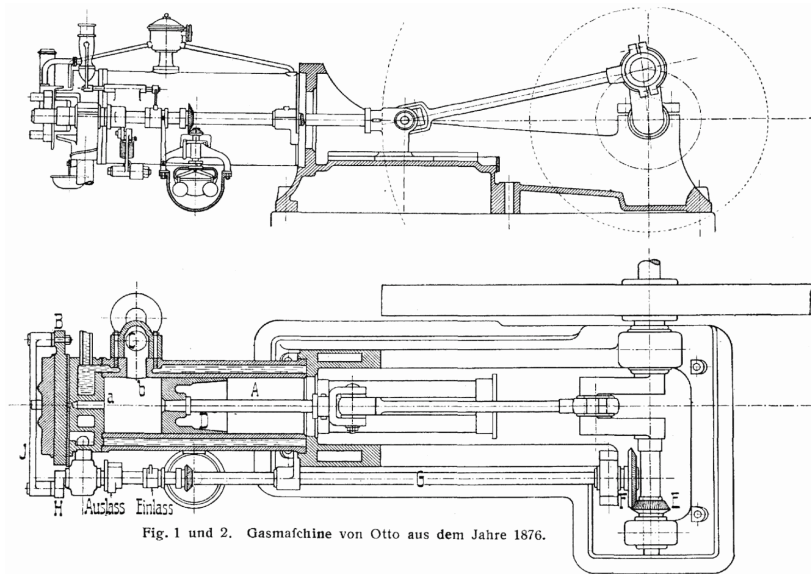


Ilustración 2.18: Motor de combustión interna de cuatro tiempos de Otto [37]

Aunque el éxito de Otto fue innegable, no supuso el punto final del desarrollo del motor de combustión interna. George Brayton en 1872 [32], y James Atkinson en 1882 [38], desarrollaron sus propias versiones del motor, con suficiente éxito y características diferenciadoras como para que cada uno de ellos supusiera una categoría propia de motor, cumpliendo respectivamente ciclos termodinámicos diferentes que, al igual que en el caso del ciclo Otto, fueron bautizados en homenaje a los creadores de estos motores.



Ilustración 2.19: George Brayton (izda) [39] y James Atkinson (dcha) [38]

Por supuesto, no es posible realizar una reseña histórica de los motores de combustión sin mencionar a Karl Benz. Este registró en 1879 su propia patente de un motor de gas de combustión interna de dos tiempos, y en 1886, diseñó y fabricó su propio motor de cuatro tiempos, que incorporó al automóvil, también de su diseño, y a partir del cual crearía la primera gran industria de producción en serie de automóviles [41].

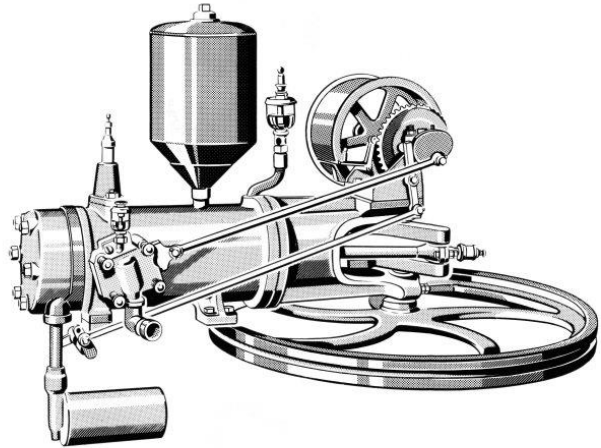
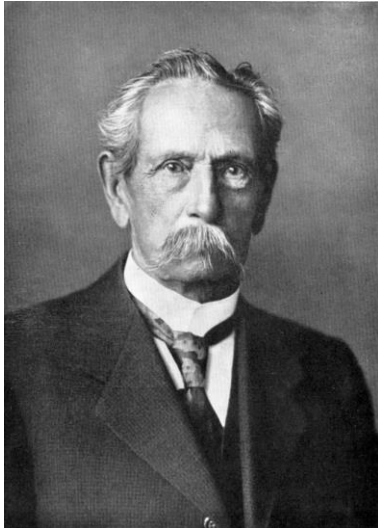


Ilustración 2.20: Karl Benz (izda) [41] y su motor de cuatro tiempos (dcha) [42]

En 1892, y continuando con su desarrollo en años posteriores, Rudolf Diésel creó su variante propia del motor de combustión interna, teniendo esta un gran éxito, pues fue concebida como una versión avanzada del motor de Otto, pensada para acercarse más a la eficiencia ideal del ciclo de Carnot [43]. Si bien ciertamente el motor diésel logró altos niveles de trabajo, presentaba desventajas (ruidoso, altos costes de fabricación, y peor comportamiento en general) lo que le impidió superar de forma definitiva al anterior. Aún hoy, ambos tipos de motores siguen en pugna por el liderazgo en cuestión de eficiencia y potencia en los motores en los que se aplican.

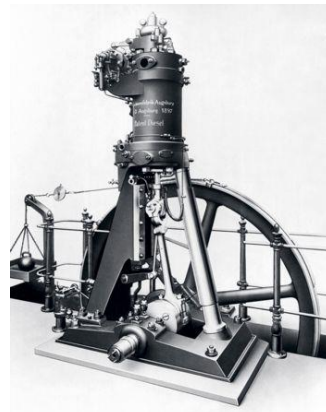
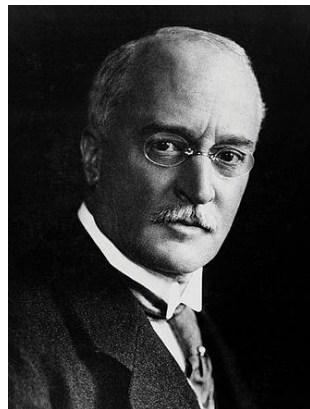


Ilustración 2.21: Rudolf Diésel (izda) y su motor de combustión interna (dcha) [44]

Habiendo llegado a este punto de desarrollo, durante el siglo XX se encuentra poco avance en lo que respecta a los motores de combustión interna, y los esfuerzos dirigidos a estos se orientan a incrementar su eficiencia y capacidad de trabajo, más que a desarrollar nuevas configuraciones. Esto también ocurre como una consecuencia de la aparición de nuevos motores que suscitan más interés para la tecnología en desarrollo durante este siglo, como la turbina de gas.

Situándonos en la actualidad, podemos encontrar que los motores de combustión interna ocupan un lugar tremendamente importante en la tecnología industrial en general. Si bien su diseño básico quedó establecido hace mucho, se ha comprobado que gozan de un amplio margen de mejora. El motor Webster presentado aquí, con su sistema de funcionamiento basado casi íntegramente en utilizar aire como combustible, se revela como una opción segura y limpia, en una época en la que la eficiencia y el desarrollo sostenible deben ir de la mano en su avance.

3. - SOFTWARE

3.1. - CATIA

3.1.1. - SOBRE CATIA

Antes de abordar el objetivo principal del presente Trabajo es menester hacer un inciso sobre el programa de software que se empleará para el modelado de los motores: el programa de diseño asistido por ordenador CATIA.

CATIA (computer-aided three dimensional interactive application) es un programa informático de diseño, fabricación e ingeniería asistido por ordenador, desarrollado por la empresa Dassault Systèmes, considerado hoy en día uno de los software más potentes y versátiles en este campo.

Este software es extremadamente versátil, habiéndose convertido en una herramienta multidisciplinar útil en todos los estadios de desarrollo de un producto de ingeniería, incluyendo las etapas de diseño (CAD), desarrollo de la ingeniería (CAE) y producción (CAM). CATIA permite desde la creación de piezas en 3D, pasando por la base de bocetado en 2D, hasta la creación de sistemas complejos de maquinaria, incluyendo en su metodología no solo el diseño en sí mismo, sino que también contempla los procesos de fabricación, simulación con máquinas y herramientas, y todo cuanto pueda estar implicado en la creación del constructo en cuestión [45]-[46].

El programa CATIA es desarrollado en 1971, por la empresa francesa Avions Marcel Dassault, de la que más tarde se haría subsidiaria Dassault Systèmes, para utilizarla como herramienta para el desarrollo de la aeronave *Mirage* [46]-[47]. Como se ha comentado, en 1981 se crearía la subsidiaria anteriormente mencionada, que se haría cargo de desarrollar y comercializar el software [47]-[48].

Desde el lanzamiento inicial del programa, este se ha continuado desarrollando y mejorando, a la par que se incorporaban consecutivas versiones y actualizaciones. Para el presente trabajo se va a utilizar CATIA en su versión V5, inicialmente lanzada en 1998, en su actualización de mejora de versión R19, presentada en 2008 [49]. Es de reseñar que esta podría considerarse una de las versiones más estables y longevas, enfocada como una especie de versión “final”, pensada para perdurar y utilizarse durante varios años. Esto se hace patente en que, a pesar de que en 2011 se presentaba de forma oficial la versión V6 [50], la V5 se ha seguido desarrollando, mejorando y actualizando paralelamente a esta última.

El programa CATIA fue lanzado en sus inicios como un software de apoyo a la ingeniería aeronáutica, y ciertamente este campo ha sido el de su principal desempeño. La compañía Boeing ha reportado usarlo asiduamente, y tiene en contrato todos los

productos y softwares emitidos por Dassault Systèmes. Sin embargo, no son los únicos; otras empresas punteras en el sector, como Airbus o BAE Systems, también usan la tecnología CATIA. Algunos ejemplos de aeronaves de las que se conoce que han sido desarrolladas ampliamente mediante el uso de este software son los Boeing 777, 787, el Xian JH-7, el Eurofighter Typhoon, o el Boeing V-22 Osprey [51].

No obstante, su versatilidad le ha permitido expandirse y ser utilizado en multitud de áreas de ingeniería y desarrollo de maquinaria, como automovilística, construcción naval, equipamiento industrial, servicios energéticos o arquitectura.

Si bien existen otros softwares muy competentes en el mercado aparte de CATIA, como Siemens NX, SolidWorks o Autodesk Inventor, las razones últimas por las que se ha elegido este programa para el presente Trabajo son dos: en primer lugar, el software CATIA ha sido ampliamente estudiado durante el Grado de Ingeniería Aeroespacial, existiendo una asignatura de diseño asistido por ordenador que emplea en su totalidad este programa. Es por ello que desde la perspectiva del autor este es un software conocido y con el que ya posee cierto nivel de maestría, facilitando así trabajar con este y obtener resultados de calidad, en lugar de tener que aprender el manejo de un software completamente nuevo. Aparte de esta razón, también debe mencionarse que ahondar en el manejo de CATIA es una inversión a futuro con un alto nivel de recompensa, pues como se ha mencionado anteriormente, es un software ampliamente empleado en la industria aeroespacial, lo cual motiva aún más si cabe la necesidad de aumentar las competencias con este programa.

3.1.2. - HERRAMIENTAS DE CATIA

En el presente apartado se va a tratar sucintamente sobre las herramientas principales que se han utilizado para el desarrollo del Trabajo de Fin de Grado. CATIA presenta innumerables opciones para el diseño de piezas y maquinarias; sin embargo, ateniéndonos al propósito del presente texto, nos limitaremos a aquellas que se han utilizado para el desarrollo de las piezas y el montaje de los motores sobre los que versa este Trabajo.

Lo primero que debe hacerse al iniciarse un nuevo proyecto en CATIA es especificar qué tipo de documento o archivo pretende crearse; en el Trabajo que nos ocupa, hemos trabajada con el entorno de *Part*, idóneo para el diseño de las piezas que conformarán los motores, y a continuación, una vez finalizadas estas, se ha trabajado en el apartado de *Product*, en el que las piezas diseñadas en *Part* pueden combinarse entre sí, dando como resultado el motor finalizado.

A continuación, procederemos a describir las herramientas y procesos internos de esos dos entornos que han sido utilizados para el desarrollo de este trabajo:

A. - PART

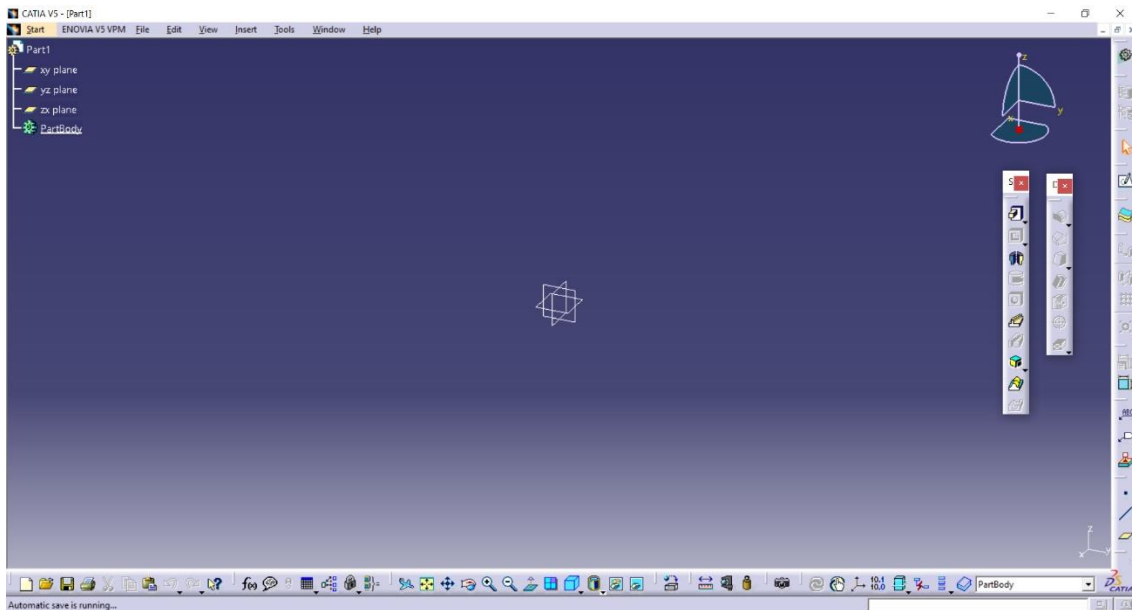
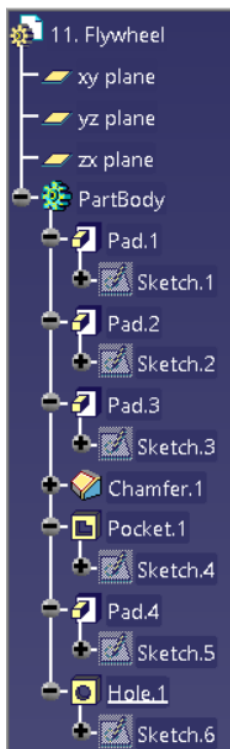


Ilustración 3.1: Entorno principal PART

En la imagen anterior se muestra la pantalla principal del entorno *Part*. A continuación, describiremos los principales focos de interés de este apartado, así como sus herramientas más importantes. Reincidimos sobre el hecho de que las herramientas que ofrece CATIA son numerosas y variadas, pero al no ser el objetivo principal del presente texto, nos centraremos en la descripción de aquellas que sean imprescindibles o que se hayan empleado en el desarrollo del Trabajo.

a. Árbol de CATIA



Este menú, observable en la esquina superior izquierda, nos muestra información clave sobre la pieza que estamos diseñando actualmente. Concretamente, nos ofrece un acceso rápido a los planos principales geométricos, sobre los que se puede trabajar, así como una relación, ordenada en el tiempo, de las diferentes operaciones y construcciones que se han ido elaborando, incluyendo, en un segundo plano, los *sketches* que han servido de base o apoyo para estas operaciones.

Los elementos de este árbol presentan la opción de hacerse invisibles, ocultándose por lo tanto dicha operación en la pieza sobre la que se está trabajando. Los *sketches* utilizados de base se ocultan automáticamente una vez que se ha generado el efecto o la operación para la que se han dibujado.

b. Menú de herramientas de visión o *View*



Este menú de apoyo, localizado en la barra inferior, presenta diferentes opciones de visualización para la pieza en desarrollo.

Las opciones más interesantes y utilizadas son las de *Fit All In*, que centra la visión en la pieza de forma óptima; *Pan*, que permite desplazarnos de forma isométrica con una vista panorámica; *Rotate*, que permite rotar la pieza; *Zoom In* y *Zoom Out*, herramientas básicas de zoom, e *Isometric View*, que permite acceder rápidamente a las vistas clásicas de perfil, alzado y planta de la pieza.

c. Herramientas de medición



Este menú presenta herramientas que ofrecen mediciones e información varia sobre la pieza en cuestión.

Measure Between toma medidas entre dos referencias; *Measure Item* ofrece información y varias mediciones adaptadas al elemento que se analice (el radio de una circunferencia, la longitud de una línea o el área de una superficie). *Measure Inertia* ofrece medidas inerciales calculadas sobre un volumen seleccionado.

d. Sketcher



Esta es una de las herramientas fundamentales del entorno de diseño *Part*. Para hacer uso de esta opción, hay que seleccionar una superficie plana sobre la que se trabajará; puede ser desde una superficie plana ya generada en la pieza, o un plano genérico. Una vez se accede a esta herramienta, se abre una nueva interfaz en la que se diseña en un entorno 2D. Una vez realizado el boceto, se vuelve al área de diseño *Part*, donde se puede emplear para ejecutar alguna de las herramientas principales, que serán descritas a continuación.

La herramienta *Sketcher* será analizada en profundidad más adelante en este texto.

e. Herramientas principales

A continuación, se describen las principales herramientas de diseño en CATIA. Por lo general, para poder utilizar estas opciones se requiere un boceto previo, que se usará de guía. Un detalle importante a tener en cuenta es que, gracias a la facilidad de manejo de CATIA y su versatilidad, puede obtenerse el mismo resultado combinando y utilizando de formas diversas diferentes herramientas. Así mismo, es interesante denotar que muchas herramientas funcionan como “opuestas” de otras, trabajando en la dualidad de que unas añaden material, siguiendo unas especificaciones, y otras eliminan material siguiendo esas mismas especificaciones.

La primera de las opciones es *Pad*, que permite alzar una pieza una altura determinada a partir de un boceto realizado con el comando *Sketch*. Esta es una de las herramientas más básicas y versátiles de construcción en CATIA. Con la opción secundaria *Multi-Pad* podemos seleccionar un boceto de varias celdas, a las que asignar diferentes alturas.

La siguiente herramienta es *Pocket*, que, de hecho, funciona de forma inversa a *Pad*; en este caso, sustrae de la pieza un volumen definido por la forma creada en un boceto previo, sobre el que se añade la “altura” o profundidad del *Pocket*. Al igual que en el caso anterior, posee la sub-opción *Multi-Pocket*, que permite definir en una sola acción varias profundidades de substracción.

Un caso particular de la herramienta *Pocket*, definida de forma más avanzada, es la opción *Hole*; esta se centra en elaborar agujeros en la pieza profundizando en características especiales; a efectos prácticos, esta herramienta simula un taladrado de la pieza, permitiendo definir como deseamos que sea el resultado final del fondo del agujero, así como su tratamiento en la misma superficie superior. Así, podemos especificar que el fondo del agujero tenga un determinado ángulo (resultando un fondo “cónico”) o que la parte más cercana a la superficie donde se ha realizado el taladrado presente un pequeño escalón u otras opciones similares.

La herramienta *Shaft* permite seleccionar un perfil dado por un boceto, y un eje en torno al que hacer girar dicho perfil, generando así un volumen por revolución. *Groove* funciona de forma similar, pero en este caso eliminando de la pieza el perfil seleccionado al hacerlo revolucionar en torno al eje seleccionado.

Rib funciona bajo el mismo principio que la herramienta anterior, solo que, en este caso, se selecciona el perfil y una curva que cumple la función de “guía”; así, se crea material haciendo que el perfil siga esa curva. La opción *Slot* tiene el mismo modus operandi, pero en este caso remueve el material que se encuentra en su camino.

Finalmente, la herramienta *Multi-sections Solid*, que presenta una funcionalidad más compleja, pero también más versátil; con esta, se preparan varios perfiles, y se obliga al



programa a intentar generar un sólido que englobe de forma óptima dichos perfiles guía. También se pueden añadir líneas guía para restringir las formas y figuras que genere el problema. Como en casos anteriores, también existe la herramienta *Removed Multi-sections Solid*, que funciona de forma similar, pero eliminando material.

Si bien existen algunas herramientas más y otras opciones en CATIA, estas son las principales y las que se han utilizado para el desarrollo del presente trabajo. Observándolas detenidamente se puede hacer una idea de la versatilidad anteriormente mencionada: a la hora de diseñar, por ejemplo, un cilindro con un radio y altura determinados puede dibujarse una circunferencia del radio deseado, y luego alzarla la altura especificada con la herramienta *Pad*. O bien, podría dibujarse un rectángulo, con una de sus dimensiones siendo la altura requerida, y la otra la, mitad del radio buscado; y a continuación, podría hacerse girar 360° este perfil, tomando como eje la misma línea del lado correspondiente a la altura, obteniéndose así el cilindro por revolución. Este es solo un ejemplo de la anotación realizada anteriormente, acerca de cómo CATIA nos permite obtener el mismo resultado por varios caminos.

f. Herramientas de bordeado



Este menú presenta diversas opciones centradas en el rebordeado de piezas ya construidas.

La herramienta *Edge Fillet*, utilizada sobre un borde anguloso, permite crear un rebordeado para dicho borde; en este caso, crea un borde circular según ciertas especificaciones.

Por contra, *Chamfer* también establece un rebordeado, en este caso un corte establecido con cierto ángulo o con cierta profundidad.

Finalmente, la otra herramienta más utilizada es *Shell*, que, aplicada sobre una pieza a partir de alguna superficie de esta, “vacía” la pieza, eliminando todo el material interno y dejando un espesor especificado.

g. Opciones espaciales

Las opciones presentadas en este menú permiten transformaciones en el espacio, aplicadas sobre algún constructo, sólido o efecto de alguna herramienta utilizada anteriormente. Es importante recalcar esta última especificación; estas herramientas no solo trasladan, modifican o reproducen elementos sólidos creados, sino que pueden ejecutarse sobre cualquier elemento del diseño, como pueden ser agujeros creados mediante la herramienta *Pocket*.



La primera opción, *Translation*, es una herramienta sencilla que desplaza de forma isométrica un elemento. Tiene como opciones secundarias *Rotate*, que gira el elemento seleccionado sobre un eje, y *Symmetry*, que reproduce el objeto por simetría. Es importante denotar que estas herramientas trasladan el elemento original, no lo copian; por tanto, este abandona su disposición inicial tras aplicarse el cambio. Las opciones de trabajo restantes, que detallaremos a continuación, se caracterizan porque reproducen el elemento original, manteniéndolo intacto y creando copias de este según las especificaciones que se indiquen.

La herramienta *Mirror* (no confundir con *Symmetry*) reproduce un elemento de diseño mediante una operación de simetría. Debe recordarse que con esta herramienta se mantiene el elemento original.

Por otro lado, la siguiente herramienta, *Pattern*, viene en dos variantes, *Rectangular* y *Circular*. Esta, a efectos prácticos, reproduce un elemento u objeto siguiendo un patrón, orientado según coordenadas rectangulares o circulares, estableciendo distancias, grados en el caso circular y otras variables para determinar el resultado.

h. Elementos gráficos



Finalmente, haremos una breve mención a unas herramientas básicas del entorno *Part*, que no dan como resultado constructos como tales, sino que sirven de apoyo para el diseño de estos y la utilización de algunas herramientas que necesitan ciertas referencias. Estas herramientas son *Point*, *Line* y *Plane*. Como resulta fácil de imaginar, estas opciones crean puntos, líneas y planos, que como se ha comentado, no forman parte como tal de la pieza en fabricación, sino que funcionan como apoyo o base para el uso de otras herramientas. Estos pueden establecerse de varias formas: indicando coordenadas, o con diversos tipos de medición referenciando otros elementos de la pieza que se está creando.

B. - SKETCH

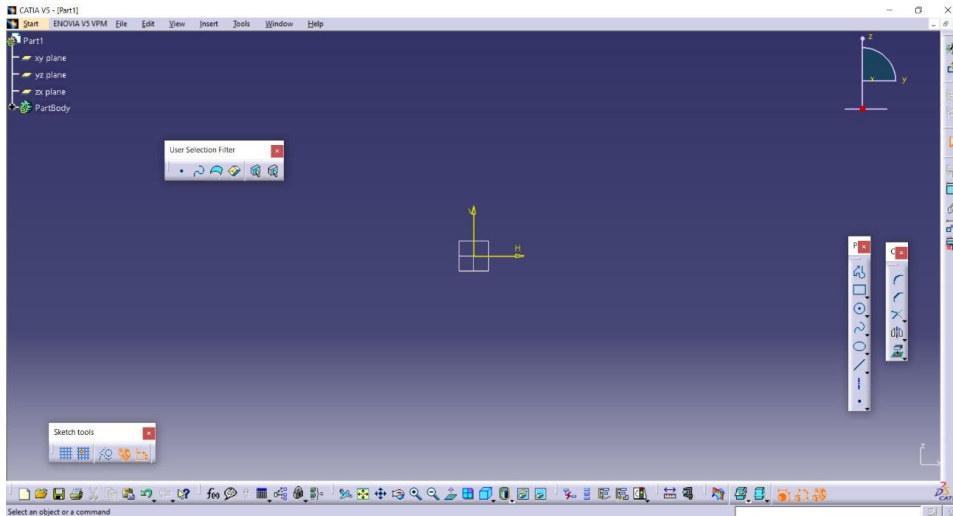
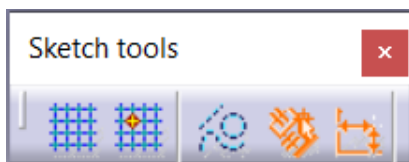


Ilustración 3.2: Entorno principal SKETCH

En este apartado trataremos más en profundidad la herramienta y entorno *Sketch*, fundamental en el trabajo con CATIA. Accedida desde el entorno *Part*, con esta herramienta se pueden crear bocetos que luego serán utilizados en el estrato superior del programa, sirviendo de base o guía para el uso de las herramientas de diseño.

Describiremos a continuación herramientas y características propias de este entorno.

a. Sketch Tools



Este menú ofrece diversas opciones para apoyar el trabajo en el entorno *Sketch*.

La primera opción es *Grid*, que simplemente establece una cuadrícula de coordenadas cartesianas, para facilitar la realización del boceto y calcular distancias. Esta herramienta puede activarse o desactivarse a gusto del diseñador. Debe hacerse notar también que la cuadrícula como tal “existe” y está activa en todo momento, sirviendo esta opción para decidir si se quiere que esta resulte visible o no.

La opción contigua, *Snap to Point*, que también puede activarse o desactivarse, fuerza al cursor a desplazarse siguiendo la cuadrícula (sea esta visible o no, según si se ha activado la opción de visualizarla con *Grid*). Es una herramienta útil en el caso de que se esté trabajando mediante coordenadas prefijadas.

Finalmente, de este menú señalaremos la opción intercambiable de *Construction/Estándar Element*. Mientras esta opción esté activada, todas las líneas del boceto que se creen se tratarán como “elementos de construcción”; estas son líneas auxiliares, que no forman parte intrínseca del boceto, y que sirven de apoyo y ayuda al diseñador. Estas líneas se caracterizan por aparecer entrecortadas. En todo momento, cualquier línea trazada en este entorno puede seleccionarse, y activando esta opción mientras se mantiene seleccionada, puede cambiarse su naturaleza de línea de apoyo a línea estándar y viceversa.

b. Herramientas de dibujo



Estas son las herramientas básicas para la realización de un boceto en *Sketch*. Por lo general, se trata de opciones sencillas e intuitivas, que permiten diseñar formas varias, que luego serán utilizadas en el nivel superior del programa.

Debe recordarse que para poder ejecutar el comando *Sketch* debemos seleccionar primero una superficie o plano, sobre la que se elaborará el boceto.

La primera selección de opciones, siendo la prioritaria *Rectangle*, nos permite crear de forma directa varias formas geométricas cerradas a placer. En el caso concreto de la herramienta mencionada, no permitirá generar un rectángulo cuyos lados sigan los ejes cartesianos, seleccionando las posiciones inicial y final de sus esquinas opuestas. También tenemos opciones para crear rectángulos con sus lados siguiendo orientaciones arbitrarias, paralelogramos en general, estos últimos con los bordes redondeados, hexágonos, así como rectángulos o paralelogramos generales seleccionando el centro geométrico de estos.

La siguiente selección de herramientas trata en cambio sobre la creación de curvas regulares, ya sean circunferencias completas o arcos, con varios modos de definición: seleccionando centro y radio, tres puntos para generar el arco que los une, o eligiendo los puntos de inicio y finalización.

También tenemos herramientas como *Spline*, para la creación de curvas más personalizadas, o algunas más atípicas, como elipses, parábolas o hipérbolas.

Finalmente, tenemos las herramientas de fácil comprensión *Point* y *Line*, para crear puntos y líneas. Si bien las herramientas básicas ofrecen alta versatilidad, existen opciones complementarias para definir estos elementos, como creación a partir de tangencias y otros.

c. Herramientas de operaciones



Estas herramientas permiten la ejecución de ciertas operaciones realizadas respecto a parte de un boceto ya realizado. Las dos primeras, *Corner* y *Chamfer*, se enfocan en el rebordeo o ajuste de esquinas angulosas, y recuerdan a las herramientas anteriormente mencionadas del entorno *Part* de *Edge Fillet*, y la igualmente llamada *Chamfer*. La primera de estas permite rebordear una esquina con una curva, definiendo su radio, mientras que la segunda hace un corte añadido, con una longitud o ángulo dado.

La tercera opción mostrada es *Trim*, una herramienta interesante que, tras seleccionar dos líneas que intersecten, elimina las continuaciones naturales de dichas líneas, actuando como una versátil herramienta de ajuste.

Finalmente, se encuentran las conocidas herramientas de *Mirror* y *Symmetry*, que generan una imagen simétrica de los elementos seleccionados respecto a una línea escogida como eje. Debe recordarse que la opción *Mirror* mantiene los elementos originales además de generar los nuevos, mientras que *Symmetry* sí elimina los elementos originales.

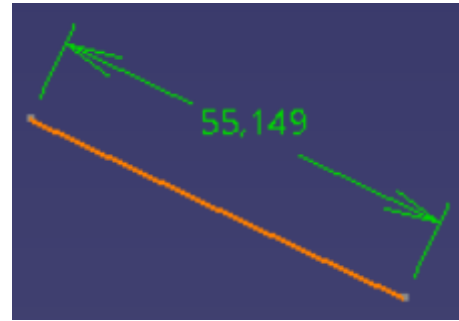
d. Restricciones



Estas son unas herramientas clave y fundamentales para el trabajo en el entorno *Sketch*. Si bien en esta ventana se puede trabajar con cierta libertad, el programa, para asegurar su correcto funcionamiento y que no se genere ningún posible conflicto, habitúa a exigir que todo cuanto sea diseñado en la pestaña *Sketch* este plenamente definido; esto es, que se hayan restringido al 100% los grados de libertad de los elementos creados, quedando así estos fijados en el plano. Como se ha dicho, si bien esto no es imprescindible y se puede construir en el estrato *Part* con sketches que no estén completamente definidos, al hacerlo correctamente nos aseguramos, por un lado y como ya se ha dicho, de evitar cualquier posible incidencia en el caso de que el programa requiera alguna exigencia específica, y además, nos sirve para que, si se requiere examinar posteriormente el sketch, identificar rápidamente las medidas utilizadas y agilizar la introducción de cualquier cambio. De esta forma, la aplicación de estas restricciones convierte el boceto de forma efectiva en un plano de diseño. De hecho, se puede afirmar que esta información añadida a los elementos del sketch funciona literalmente como cotas, imprescindibles de añadir en cualquier trabajo ingenieril.

Así, nos encontramos con dos opciones para añadir restricciones. La primera, más básica, es la herramienta *Constraint*, que, al seleccionar un elemento, nos permite

añadirle una cota básica estándar para cada tipo de trazado. Así, al activarla sobre una línea, nos permitirá establecer su longitud, o el radio si la ejecutamos sobre una curva. Esta también nos permite establecer interacciones entre distintos elementos: al seleccionar dos líneas paralelas, ejecutar *Constraint* nos permitirá establecer la



distancia que separa esas dos líneas. Por el contrario, si seleccionamos dos líneas no paralelas, activar esta opción nos dejará establecer el ángulo que forman dichas líneas. Por lo tanto, la herramienta *Constraint* elige intuitivamente la medida, cota o restricción más plausible que se desee establecer para un elemento o un conjunto de ellos.

Ilustración 3.3: Ejemplo de uso de la herramienta *Constraint* (aplicando longitud sobre línea)

Por otro lado, tenemos la opción *Constraint Defined in Dialog Box*. Esta herramienta, más avanzada que la anterior, nos permite elegir entre una gama más amplia de restricciones para nuestra selección de elementos. Dentro de esta selección, por supuesto, se incluye la que el programa habría incluido de forma automática con *Constraint*, pero ofrece además otras opciones menos intuitivas. Esta opción es especialmente útil para establecer restricciones y apoyar al diseño cuando se trata de relacionar varios elementos entre sí.

Así, por ejemplo, si utilizamos esta opción mientras se tienen seleccionadas dos circunferencias, se nos desplegará un listado de posibles restricciones a establecer entre ellas, como especificar que sean concéntricas, que coincidan exactamente, establecer tangencias entre ellas, o especificar la distancia que separa sus centros, entre otras. Se revela así que esta opción es mucho más potente que la herramienta básica *Constraint* (aunque esta, al estar automatizada, es más rápida para hacer especificaciones sencillas).

Debe reseñarse que, mientras se trabaja en la ventana de *Sketch*, cualquier línea del dibujo que no esté completamente definida, esto es, que aún le resten grados de libertad, aparecerá señalada en blanco. Una vez que un elemento esté completamente definido (o “restringido”), este aparecerá marcado en verde.

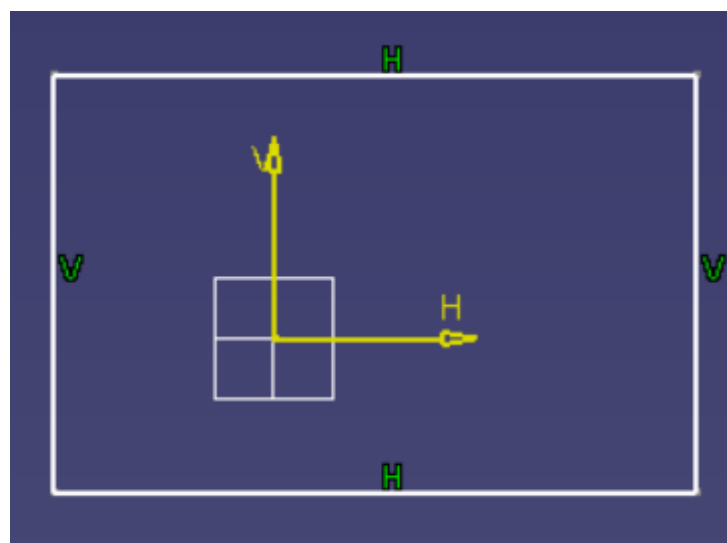


Ilustración 3.4: Figura en *Sketch* no definida

En la imagen anterior puede observarse un rectángulo cuyas líneas conformantes no están definidas. Así, aparece en blanco. Obsérvese, no obstante, que, a pesar de ello, sus lados sí presentan aplicadas las restricciones de *horizontalidad* y *verticalidad* (aunque no son suficientes para definir por completo el diseño).

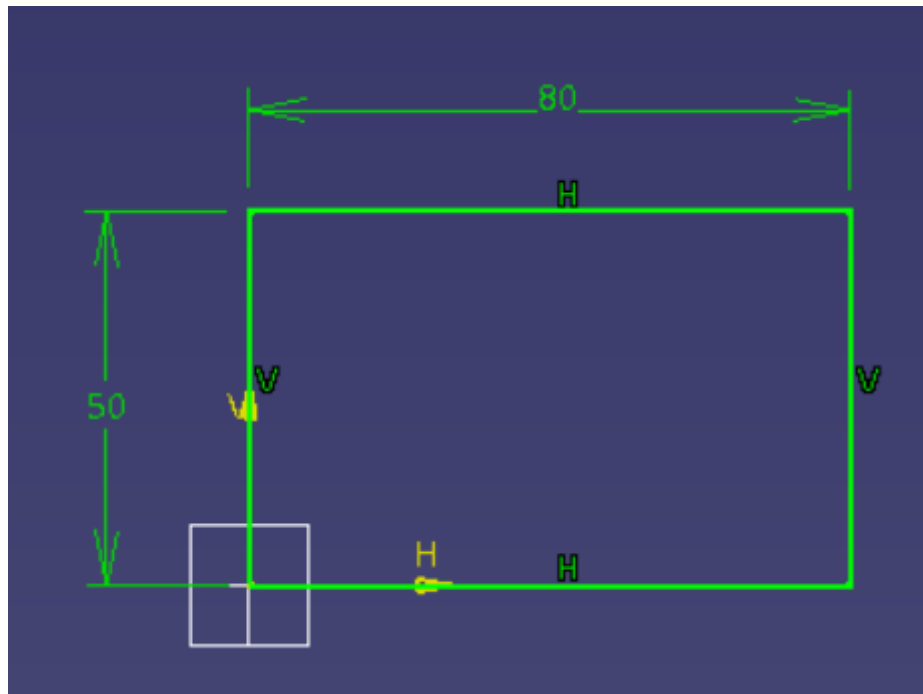


Ilustración 3.5: Figura en Sketch completamente definida

En la imagen anterior, a diferencia de en la previa, el rectángulo al completo aparece marcado en verde: está definido y en situación óptima para trabajar con él en el entorno *Part*. Para ello, se ha hecho coincidir la esquina inferior izquierda con el origen de coordenadas, y sumado a las condiciones anteriormente mencionadas para mantener las líneas verticales y horizontales, se les han añadido las cotas que definen su longitud, cumpliendo así los requisitos necesarios para que el boceto quede completamente restringido en cuestiones de movimiento o deformación.

C. - PRODUCT

En esta sección se comentará el último de los entornos de trabajo de importancia que han sido empleados para el desarrollo del presente Trabajo: la zona de trabajo *Product*.

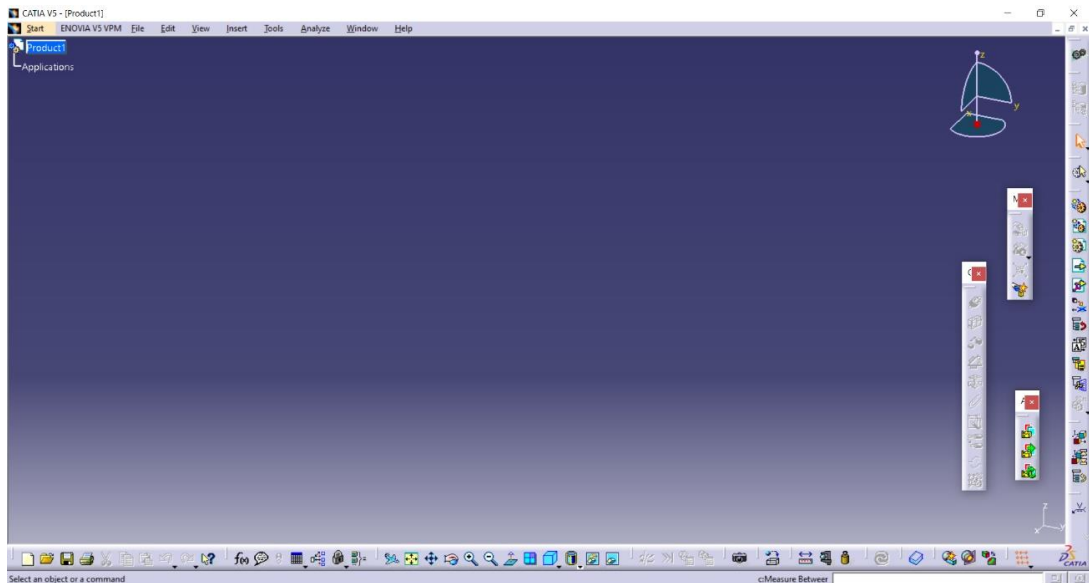


Ilustración 3.6: Entorno principal PRODUCT

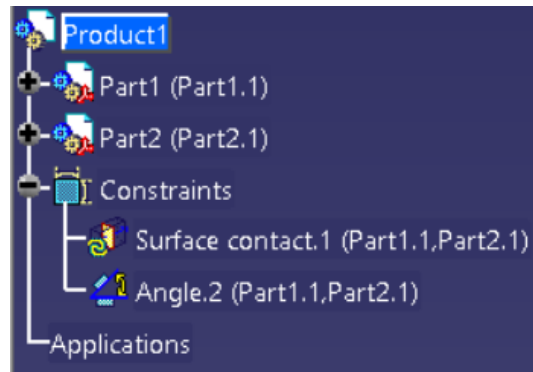
En la misma categoría que *Part*, *Product* es uno de los entornos de trabajo que se pueden seleccionar al iniciar un nuevo proyecto. Una vez se ha accedido a su pantalla principal, la metodología de trabajo consiste en importar las piezas individuales creadas como *parts*, y a continuación relacionarlas entre sí. Así, la pestaña *Product* funciona a efectos prácticos como un ensamblador, uniendo las piezas creadas con anterioridad y generando así el producto terminado. Así es como se ha desarrollado este Trabajo: se han creado las piezas individuales de ambos motores como *Parts*, que luego se han ensamblado como *Products* para obtener como resultado los motores terminados.

Es necesario reseñar también que a la ventana *Product* es posible importar así mismo otros *Products* ensamblados previamente: estos se comportarán como un sólido inalterable, como si fueran piezas sólidas individuales. Esta opción es útil para no sobrecargar excesivamente un mismo *Product*, permitiendo crear el producto final por partes, una forma muy versátil de enfocar el trabajo, especialmente si se cuentan con secciones que incluyen piezas muy pequeñas o que configuran de forma evidente un módulo separado.

A continuación, se explicarán sucintamente algunos de los elementos y herramientas encontradas en esta ventana:

a. Árbol

Una vez se han empezado a importar piezas o *parts* a la pestaña de *Product*, el listado numerado de estas va apareciendo en el árbol o esquema que aparece en la esquina superior izquierda. Si se despliegan las ramas secundarias de estas partes, pueden comprobarse especificaciones de estas. Así mismo, la última de las opciones que aparecen al final del árbol es la sección de *Constraints*, que recoge las restricciones y relaciones que se han ido estableciendo entre las diferentes piezas.



b. Constraints



A continuación, se describirán las principales herramientas del entorno *Product*: las *Constraints* o restricciones. Estas diferentes opciones permiten establecer diversas relaciones entre las piezas que se hayan importado, ligándolas entre sí y dándole cohesión al producto final.

La primera herramienta, *Coincidence Constraint*, establece una correlación por coincidencia entre dos elementos; su uso más habitual es establecer la coincidencia de ejes para alinear círculos o elementos curvos entre diferentes piezas. Es muy utilizada, por ejemplo, para alinear los agujeros realizados en diferentes *parts* para pasar tornillos.

La siguiente opción es *Contact Constraint*, que, explicada en pocas palabras, establece que dos superficies seleccionadas de dos piezas estén en contacto, es decir, a distancia relativa nula. Debe tenerse en cuenta la importante apreciación de que esta herramienta impone que esas dos superficies, supuestas planas, pasen a estar contenidas en el mismo plano, pero no necesariamente tienen que tocarse de forma directa.

En relación con la última aclaración realizada en el comentario anterior, tenemos la herramienta *Offset Constraint*, que establece una distancia mínima entre dos superficies de diferentes piezas.

Así pues, a efectos prácticos, esta última opción, utilizada entre dos superficies planas, funciona como la herramienta *Contact Constraint* si la distancia se establece en 0.

Finalmente, la herramienta *Angle Constraint* establece un determinado ángulo entre superficies planas de dos piezas.

Hay que tener en cuenta que siempre que en las anteriores aclaraciones se ha referido a “superficies planas”, esto también incluye los planos cartesianos xyz adjuntos a cada pieza. Esta consideración es muy útil, ya que implica que siempre existirán unas superficies planas de referencia para trabajar con las restricciones que hemos descrito.

Finalmente, haremos una mención especial a la opción *Fix*, que fija las posiciones relativas que los objetos tenían unos con respecto a otros en el momento de activar la herramienta. Sin embargo, esta herramienta se considera un recurso de emergencia en caso de ser incapaces de encontrar ninguna relación útil o válida. Por lo general, se favorece el uso de las herramientas anteriores.

c. Update All



Cerraremos este capítulo con una mención a la herramienta fundamental *Update All*. Una vez se ha definido alguna restricción o ligadura entre elementos de las piezas importadas en el *Product* actual, si se ejecuta el comando *Update All*, dichas restricciones se harán efectivas, y las piezas se posicionarán cumpliendo dichas ligaduras. Si bien podemos mover con libertad todas las piezas en nuestro entorno de trabajo, cada vez que se active esta opción estas volverán a sus posiciones correlativas con el resto del conjunto. Así, esta herramienta permite constatar que el producto está adoptando la forma requerida. Un ejercicio habitual consiste en mover las piezas a posiciones arbitrarias y ejecutar repetidamente este comando, para asegurarse así de que no queda ningún grado de libertad importante sin determinar.

Por supuesto, al establecer relaciones entre varias piezas puede darse el caso de que estas sean contradictorias o incompatibles. En caso de que esto suceda, CATIA lo identifica instantáneamente y no permite continuar con el modelado hasta que estas restricciones conflictivas sean arregladas o eliminadas.

3.2. - Keyshot

3.2.1. - SOBRE KEYSHOT

A continuación, en el siguiente apartado haremos un comentario sobre el software Keyshot, empleado en el presente Trabajo para realizar el renderizado de las piezas obtenidas con CATIA.

Como podrá comprobarse más adelante, las piezas obtenidas con el programa de diseño CATIA presentan una estética orientada principalmente al sentido práctico; se marcan de forma sucinta los bordes de las piezas, las superficies presentan un aspecto monótono uniforme, y la iluminación es indirecta y aplicada de forma genérica en toda la pieza de forma similar. Como se ha indicado, esta estética se basa en la funcionalidad, buscando que los contornos y superficies puedan distinguirse con facilidad, facilitando el trabajo, siendo este último el objetivo prioritario.

Sin embargo, una vez obtenidas las piezas definitivas, es necesario en cualquier trabajo de ingeniería mostrar cual sería el aspecto real y último que mostrarían dichas piezas. Esto no es una simple cuestión de embellecimiento, sino que resulta vital para poder aseverar que realmente se está obteniendo el resultado buscado. Así pues, a las piezas creadas con el programa de diseño se le aplicarán unos materiales, texturas y distintos enfoques de iluminación para así constatar la apariencia real de dichas piezas una vez que sean fabricadas. A este proceso descrito se le conoce como renderizado.

Como se comentaba al inicio, en nuestro caso emplearemos el software de renderizado Keyshot, el cual está dentro del paquete de software Solid Edge, uno de los grandes competidores dentro del sector de diseño asistido por ordenador [52]. Concretamente, Keyshot se trata de un programa muy potente, con multitud de opciones que permiten obtener renderizados de altísima calidad [53].

Al igual que ocurría con CATIA, existen multitud de opciones a la hora de elegir un programa de renderizado: Maya, Lumion, Cine 4D, Thea Renderizar, etc. La principal razón por la que se eligió Keyshot coincide con aquella por la que se eligió CATIA; este programa era conocido previo a la realización del presente trabajo, lo cual permitiría desarrollar este texto sin necesidad de aprender un software nuevo, y sobre todo, porque existía una confirmación de primera mano de las capacidades y la potencia de este, teniendo la seguridad de que cumpliría las expectativas depositadas para un trabajo de este calibre.

Al igual que hicimos anteriormente con CATIA, enunciaremos a continuación las principales herramientas que hemos utilizado para el desarrollo del presente Trabajo. Reincidimos sobre el hecho de que las opciones que presenta Keyshot son numerosas y muy versátiles; en nuestro caso, hemos utilizado las herramientas en su formato más básico, buscando simplemente obtener unas imágenes de calidad que ofrezcan una representación realista de las piezas que conforman nuestros motores.

3.2.2. – HERRAMIENTAS DE KEYSHOT

Describiremos a continuación los principales elementos de la interfaz principal de Keyshot, así como un breve comentario de las herramientas que pueden encontrarse en esta. Como se ha indicado anteriormente, este programa presenta una amplia gama de opciones de trabajo; nosotros nos limitaremos a las principales que no han permitido obtener de forma sencilla los resultados buscados.

A. - INTERFAZ PRINCIPAL

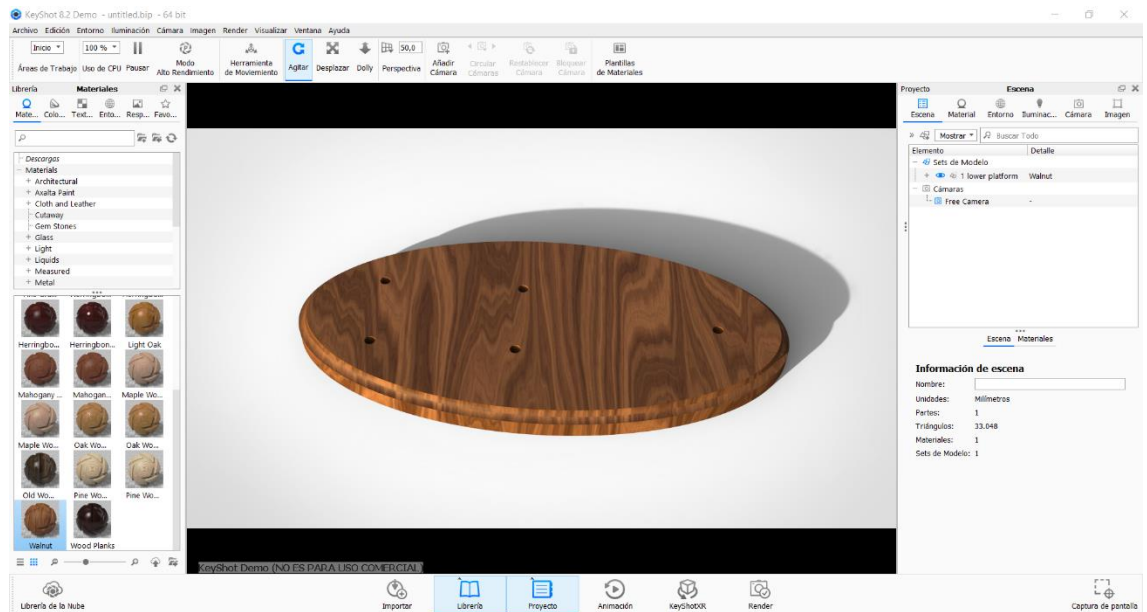


Ilustración 3.7: Interfaz principal de Keyshot

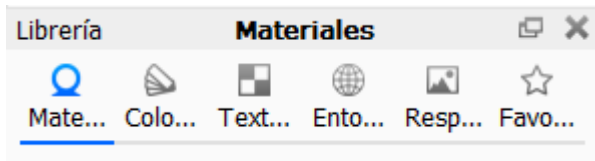
La imagen anterior nos muestra el aspecto estándar habitual de la interfaz principal del programa Keyshot. En la ventana central se muestra el aspecto actual, con las especificaciones indicadas hasta el momento, de la pieza o conjunto de piezas con las que se está trabajando. Esto último es una aclaración importante: este software admite tanto la importación de piezas individuales como conjuntos de ellas. En este último caso, puede trabajarse con las piezas del conjunto por separado, asignándoles materiales y texturas por separado, de forma personalizada. Evidentemente, algunas otras opciones, como la iluminación, el entorno o el fondo trabajan de forma general para todo el conjunto.

Aparte de la ventana central, donde se muestra la pieza, reseñaremos la herramienta básica que podemos observar en la línea inferior, *Importar*. Seleccionándola, podemos elegir los archivos de piezas que se desean traer a Keyshot para trabajar sobre ellos. Tal y como se ha comentado antes, puede tratarse tanto de piezas individuales como conjunto de ellas. Dado que nuestro programa de diseño origen es CATIA, importaremos archivos *.part* para las piezas individuales, y archivos *.product* para los

conjuntos de estas. También cabe mencionar que se pueden importar varios archivos *.part* por separado y trabajar con todos ellos a la vez.

A continuación, se comentarán de forma particular el resto de las pestañas, ventanas y herramientas que podemos encontrar en la interfaz de Keyshot.

a. Librería



Esta barra de herramientas es primordial para el trabajo en Keyshot. Está situada en la parte izquierda de la interfaz, y presenta las principales opciones de diseño y personalización, que serán aplicadas sobre el proyecto en curso.

En general, todas las opciones se muestran como amplios muestrarios, para elegir dentro de cada categoría la selección que más se adecue a nuestro trabajo en desarrollo.

a. Materiales

Esta primera pestaña nos ofrece una gran gama de materiales que podemos aplicar a nuestras piezas. Están clasificados por tipos (metales, maderas, cristales, plásticos, etc.), y se nos presenta una pequeña representación visual para hacernos una idea general del aspecto antes de su aplicación.

b. Colores

Al igual que en el caso anterior, se nos ofrece una amplia selección de opciones. En este caso, se trata de colores personalizados, que pueden aplicarse sobre las piezas, de forma independiente al aspecto general del material seleccionado, modificando este dentro de unos parámetros.

c. Texturas

De forma similar al anterior, esta pestaña nos ofrece una posibilidad de personalización para el aspecto de la pieza, que puede trabajar aplicándose sobre el material primario seleccionado. En este caso se trataría de texturas, que ofrecen cierto relieve y estética al material.

Para entenderse las opciones de personalización, podríamos suponer que seleccionamos un tipo de madera para nuestra pieza; por ejemplo, “nogal”. Esta opción ya incluye unas opciones de color y texturas estándar, pero trabajando con las pestañas de Colores y Texturas, podemos modificar estos parámetros, cambiando la apariencia básica de la madera de “nogal” por opciones más personalizadas.

d. Entorno

Esta se trata de una herramienta de vital importancia, puesto que añade las opciones de iluminación al proyecto en curso. Al seleccionar la opción, se nos muestra una serie de opciones de entorno, divididos entre interiores y exteriores. Al aplicarlo sobre la ventana central, nuestra pieza aparece representada dentro de este entorno, ya sea un polígono industrial, campo abierto o en el interior de una estancia. En todo caso, el aspecto externo del entorno puede ser simplemente anecdótico, puesto que es posible sobrescribir este con la opción de fondo que se comentará a continuación. Sin embargo, la parte fundamental de esta herramienta, las opciones de iluminación, se mantiene.

Así, podremos representar nuestro constructo ante unas opciones de iluminación de mayor o menor intensidad, con luz cálida o fría, y con diversos ángulos de inclinación. Esto resulta fundamental, puesto que cada entorno puede llegar a ofrecer visualizaciones muy diferentes de la pieza. Por lo tanto, ha de buscarse aquella opción que aúne la visualización esperada más fiel posible, dentro del entorno de trabajo esperado para la máquina.

e. Respaldos

Mencionada en el apartado anteriormente, esta opción permite añadir un fondo para la visualización de la pieza. Como se comentó, se superpone al aspecto externo del entorno, aunque se mantienen las opciones de iluminación sobre la pieza, así como las sombras que esta genera. Esta opción es fundamentalmente estética.

Como comentario reseñable, para el presente Trabajo se ha favorecido el fondo *White Solid Vignette*, que muestra un fondo blanco uniforme, para una mejor representación visual de mayor claridad.

f. Favoritos

Meramente anecdótica, en esta pestaña pueden guardarse diversas opciones de las pestañas anteriores que se espera utilizar repetidamente, para facilitar el acceso y la búsqueda.

b. Movimientos

Las siguientes herramientas, que podemos encontrar en la barra superior, a grandes rasgos, permiten desplazar la pieza sobre la que se está trabajando de diversas formas, para facilitar el trabajo sobre esta y su visualización.

a. Dolly

Esta herramienta funciona a efectos prácticos como un zoom, permitiéndonos aproximarnos o alejarnos de la pieza.

b. Desplazar

Con esta opción podemos mover de forma isométrica la pieza, siguiendo una perspectiva panorámica.

c. Agitar

Empleando esta herramienta podemos girar la pieza con libertad con cualquier orientación.

d. Herramienta de movimiento

Esta última herramienta se revela como la más versátil de las diferentes opciones, puesto que a efectos prácticos incluye todas las anteriores.

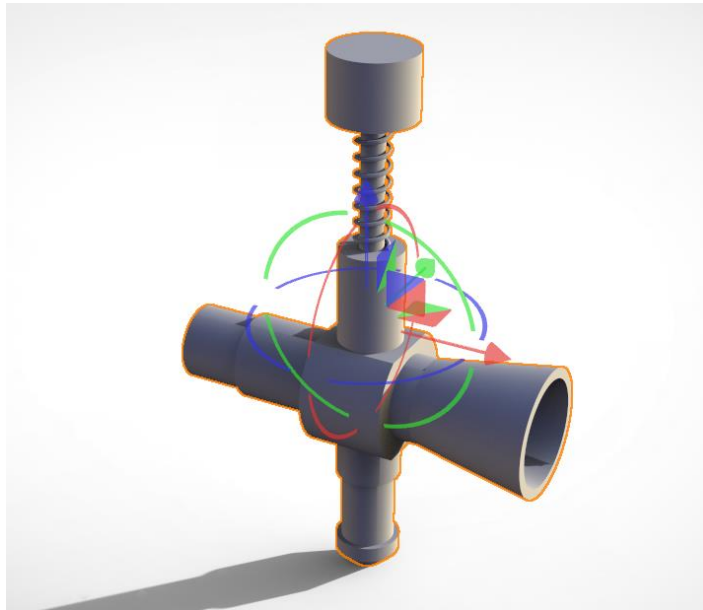


Ilustración 3.8: Opciones de la herramienta de movimiento

Como puede observarse en la imagen anterior, al aplicar esta opción sobre la pieza, se despliegan sobre esta todos los movimientos de rotación y traslación disponibles, tomando los ejes cartesianos como referencia.

No obstante, como ya hemos visto anteriormente en otras herramientas habituales de este tipo de software, si bien ciertamente esta opción es la más potente y versátil, también añade pasos extra y un manejo más complejo. Así, se favorece el uso de las herramientas anteriores básicas si podemos obtener el posicionamiento buscado de forma sencilla con ellas, quedando esta reservada para aquellos momentos en los que sea más fácil tratar con la pieza usando ejes referenciados, o cuando no consigamos una aproximación exacta con las opciones primarias.

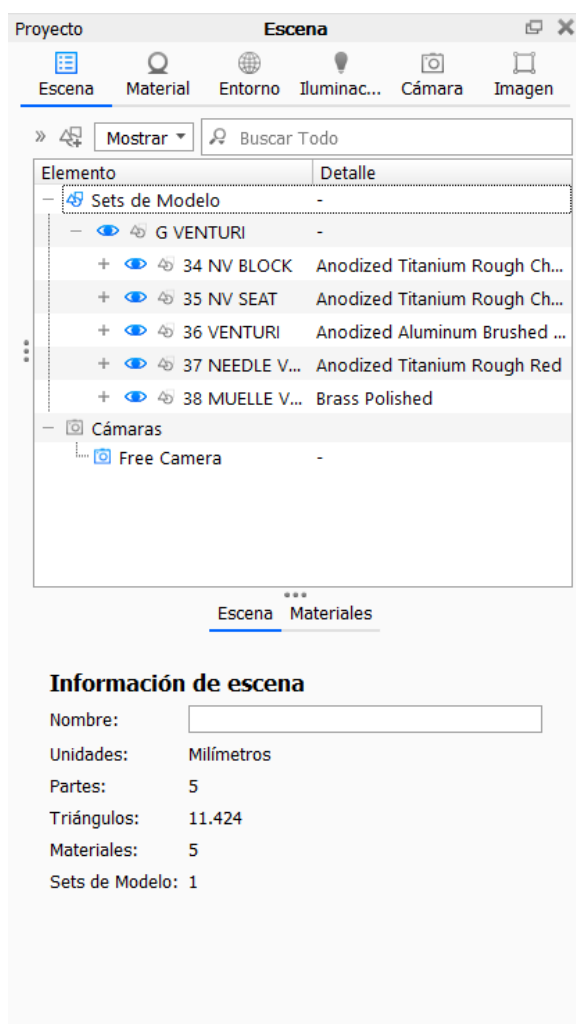
c. Proyecto

Esta ventana, situada en la esquina superior derecha, nos ofrece información útil sobre el proyecto en curso, así como opciones de personalización para cada opción o herramienta aplicada sobre las piezas.

La primera opción, Escena, nos muestra un listado con todas las piezas que han sido importadas para el presente proyecto, así como los materiales que han sido aplicados sobre cada una de ellas. También ofrece información técnica diversa.

A continuación, la pestaña Material nos muestra todos los materiales que han sido empleados hasta el momento en las diversas piezas. Seleccionándolos, se nos ofrece información sobre estos, así como opciones para modificarlos y personalizarlos: color, texturas o rugosidad, entre otras.

Del mismo modo, las siguientes ventanas nos ofrecen información sobre las opciones de iluminación y entorno que se han aplicado para el proyecto, así como la posibilidad de realizar ajustes sobre estas.



Debe mencionarse que esta es una de las principales ventajas que hacen de Keyshot un programa de renderizado increíblemente potente y versátil; si bien el propio programa incluye una gama extremadamente amplia de opciones, todas ellas son modificables y personalizables, permitiendo así al usuario crear la opción justa para el trabajo que quiere desarrollar, si no consiguiera encontrar esta entre las que el programa ofrece. Además, todas estas modificaciones pueden guardarse y añadirse a la base de datos, para ser utilizadas en proyectos posteriores.

4. - MODELADO

Una vez se ha realizado una explicación sobre el funcionamiento y las principales características y herramientas de los softwares de diseño y renderizado CATIA y Keyshot, empleados para el desarrollo de este trabajo, podemos pasar al siguiente punto de este.

En esta sección se abordará el proceso de modelado de los motores sobre los que versa el presente Trabajo. El presente apartado se revela, por lo tanto, como el núcleo central de este Trabajo de Fin de Grado. A continuación, se presentará una sucinta descripción del proceso de modelado de ambos motores seleccionados, el motor Stirling y el motor Webster. Para ello, se mostrarán las piezas que los componen, acompañadas de breves comentarios sobre las características más distintivas de cada una, así como la utilización particular de algunas herramientas del programa CATIA que fueron necesarias para su elaboración. A las imágenes de las piezas terminadas se las acompañará también de fotografías de esas mismas piezas, una vez se ha realizado sobre ellas el proceso de renderizado en Keyshot, adjuntando así mismo algún comentario a este respecto.

Por lo general, para favorecer el orden dentro del proceso de diseño, y para facilitar el entendimiento sobre cómo es el montaje de las piezas para conformar el motor terminado, se han organizado estas en diferentes subconjuntos o partes diferenciadas. Desgranando así los motores, nos resultará más sencillo enumerar las piezas que los conforman.

Así mismo, debemos denotar que el presente apartado no muestra de forma expresa la totalidad de las piezas que conforman los motores. Para evitar un alargamiento innecesario del presente texto, se han omitido aquellas piezas que sean iguales o extremadamente parecidas a otras ya mostradas, puesto que carece de interés el volver a reincidir sobre su diseño. Así mismo, también se han excluido piezas que hayan sido consideradas extremadamente sencillas, como arandelas o cilindros simples. Insistimos, no obstante, en que esto solo se refiere a la visualización de estas piezas de forma particular en este apartado de la memoria; por supuesto, ninguna pieza ha sido omitida en el proceso de fabricación, y todas ellas aparecerán en las imágenes generales de las diferentes partes del motor o en las imágenes globales en las que estos sean representados en su totalidad. Del mismo modo, a la hora de realizar el renderizado, estas piezas han sido incluidas consecuentemente.

Finalmente, denotamos como caso particular el de los tornillos, necesarios para mantener las diferentes piezas y partes de los motores unidos. En el presente trabajo han decidido omitirse, al tratarse de piezas genéricas que no están incluidas en los planos. No obstante, puede comprobarse en las siguientes imágenes que se han respetado los diferentes agujeros y taladrados orientados a la incorporación de estos tornillos.

4.1. – Motor Stirling

Comenzamos pues el apartado en el que mostraremos el proceso de modelado de los motores. Iniciaremos el susodicho apartado por el motor Stirling.

Como se ha comentado, se ha organizado el motor en diversas partes, que se irán enunciando para seguidamente, mostrar las diferentes piezas que las componen. Para todas las partes generales y piezas se mostrarán, por parejas, imágenes de las piezas terminadas mediante CATIA, acompañadas de estas mismas tras haberles aplicado el proceso de renderizado con Keyshot.

4.1.1. - BASE

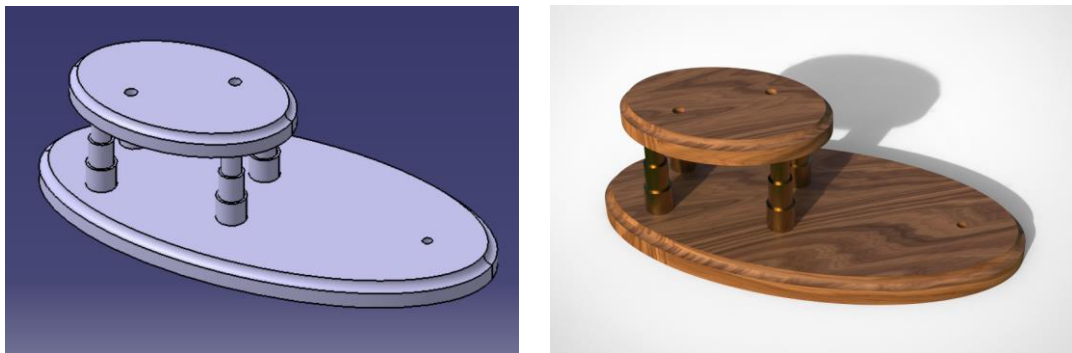


Ilustración 4.1: “Base”. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Esta parte del motor funciona como soporte básico para el resto de las piezas. Está organizada en dos niveles con plataformas de madera, sobre una serie de cuatro soportales.

Si bien se entrará en mayor detalle al examinar de forma particular las piezas, puede observarse, como se comentó anteriormente, que se han utilizado el ajuste de fondo blanco para la sección de respaldo del renderizado. Aparte, se han buscado los ajustes de iluminación que favorezcan en mayor medida una visualización clara del conjunto.

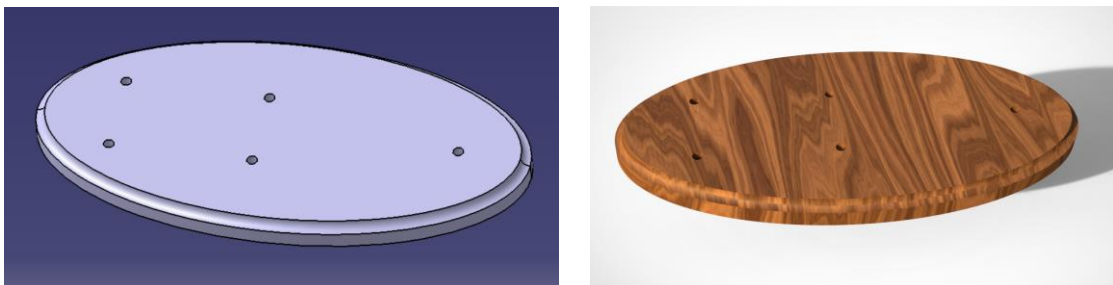


Ilustración 4.2: Lower Platform. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

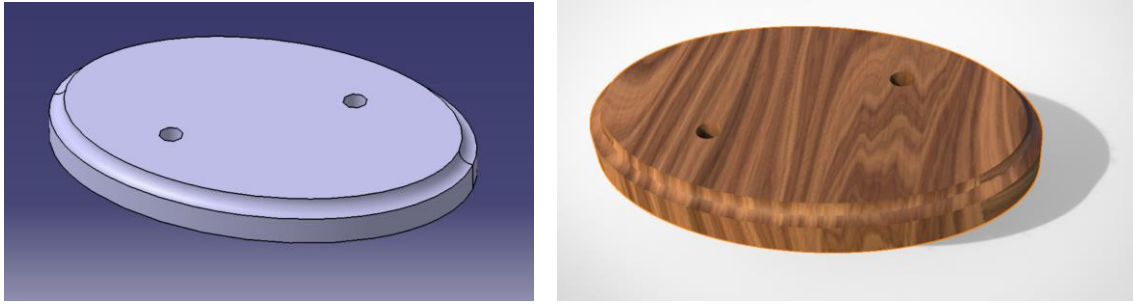


Ilustración 4.3: Upper Platform. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Las imágenes anteriores muestran las superficies de soporte. Realizadas en primera instancia con un *Pad* sencillo, fueron completadas con un *slot*, para realizar el reborde superior. Finalmente, se han realizado sobre ellas una serie de incisiones con la herramienta *Hole*, por las que pasarían los tornillos que fijarían los soportales y el resto de las piezas.

Así mismo, se les ha realizado un renderizado sencillo, en madera de nogal.

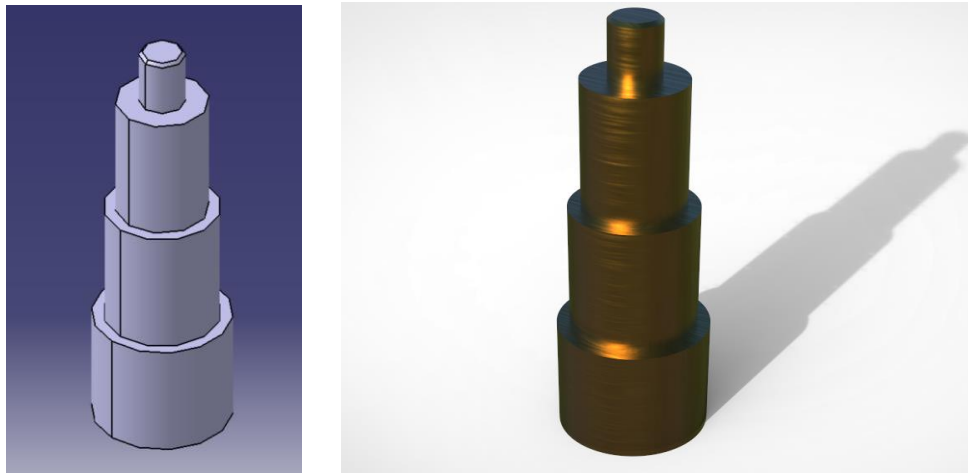


Ilustración 4.4: Platform Pillar. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Estas piezas actúan como soportales, que enlazan la base superior con la inferior. Su diseño se basa en la elaboración de una serie consecutiva de cilindros sólidos, creados unos sobre los otros, realizados mediante *sketchs* de círculos sobre los que se ha aplicado un *pad* de la longitud correspondiente.

Así mismo, debe reseñarse que presentan un orificio en su parte inferior, para poder atornillarlas posteriormente a la base. Estos agujeros son realizados con la herramienta *Hole*, más versátil y que permite una simulación más certera de los efectos de un taladrado.

El renderizado se ha realizado en latón, siguiendo las indicaciones aportadas por el fabricante original de los planos.

4.1.2. - SOPORTE DE FUENTE DE CALOR

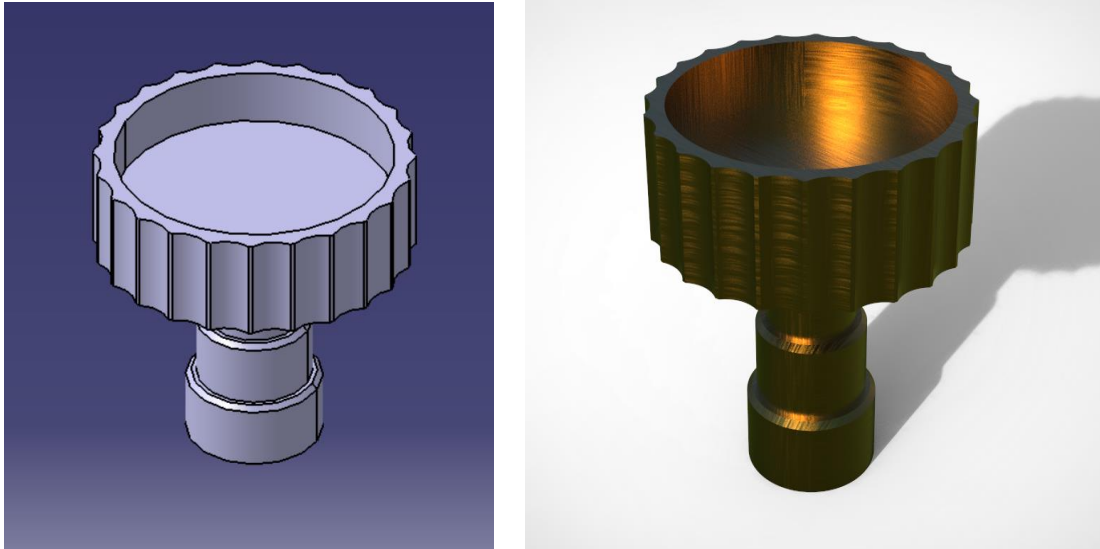


Ilustración 4.5: “Soporte fuente de calor”. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Este componente tiene la función de soportar una fuente de calor, que aumentará la temperatura del gas contenido en la probeta de cristal, que mostraremos más adelante, y que está situada justo encima de esta pieza. Como veremos a continuación, esta pieza tiene un eje central encajado a presión, y el conjunto de las piezas, encajadas entre sí, pero no fijadas, permite ajustar la altura del soporte. En principio este está pensado para contener una vela, aunque esta fuente de calor es intercambiable a placer del usuario.

A continuación, se muestran los componentes de este pilar. No se muestra el eje interno, pues se trata simplemente de un cilindro con los bordes redondeados.

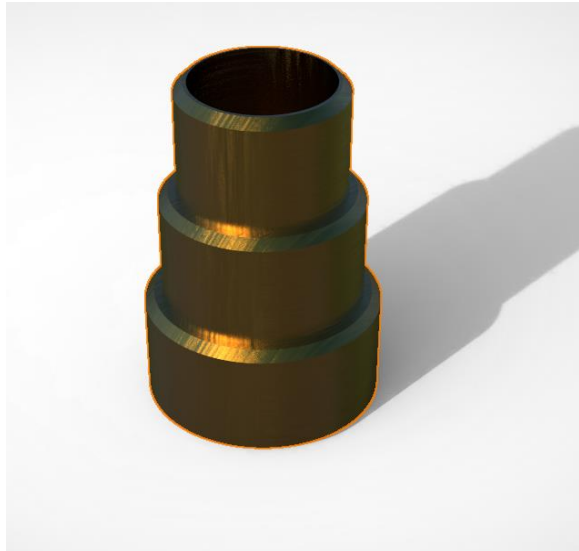
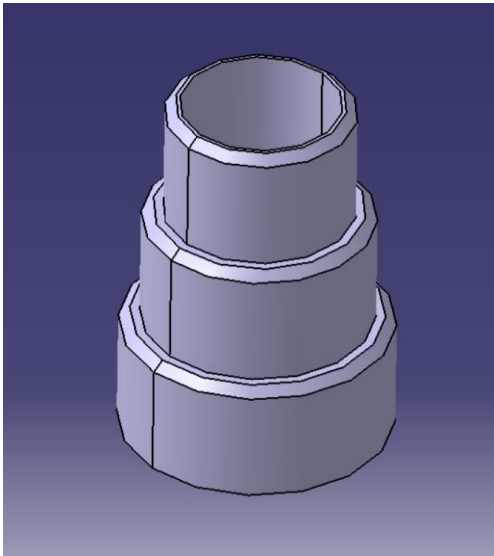


Ilustración 4.6: Candle Pillar. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Esta pieza funciona como soporte y pilar principal. Tiene una incisión en la parte inferior para atornillarla a la base. Al igual que con los soportales anteriormente descritos, para hacer esta pieza se han construido una serie de cilindros unos sobre otros con *pad*. En este caso se han redondeado con *chamfer* los bordes, y se ha hecho un agujero central para el eje con *pocket*. Para el renderizado, como es habitual para muchas piezas de este motor, se ha utilizado latón amarillento.

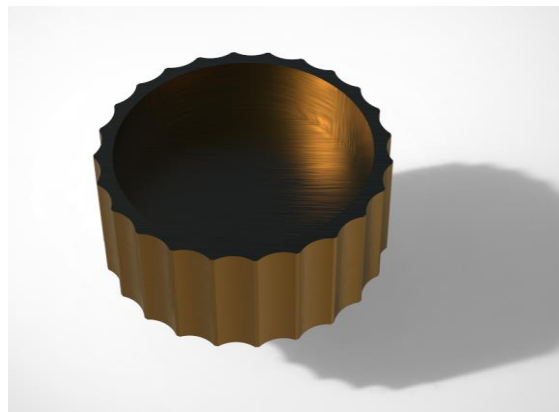
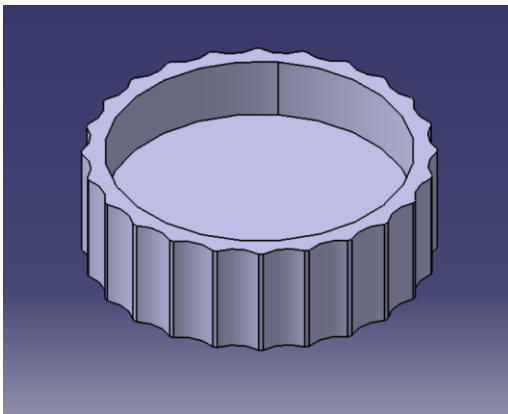


Ilustración 4.7: Candle Holder. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Para el recipiente de la vela o la fuente de calor a elegir se ha realizado un *pad* básico, y a continuación se han aplicado *pockets* para el vaciado principal y un agujero debajo, para encajar el eje. Sin embargo, lo más reseñable es el uso de la herramienta *Circular Pattern*, que se ha utilizado para reproducir un *pocket* alrededor de todo el cilindro inicial, para conseguir así ese borde dentado característico. La funcionalidad de este

borde se basa en facilitar al usuario desenroscar o enroscar manualmente este soporte, para ajustar a placer la altura de este.

4.1.3. - TORRE DE TRANSMISIÓN



Ilustración 4.8: “Torre de transmisión”. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Esta se trata de una pieza fundamental en el motor, puesto que será la que transmita el movimiento alternativo entre el pistón y la pieza móvil contenida en la probeta de cristal, que será empujada con el gas calentado.

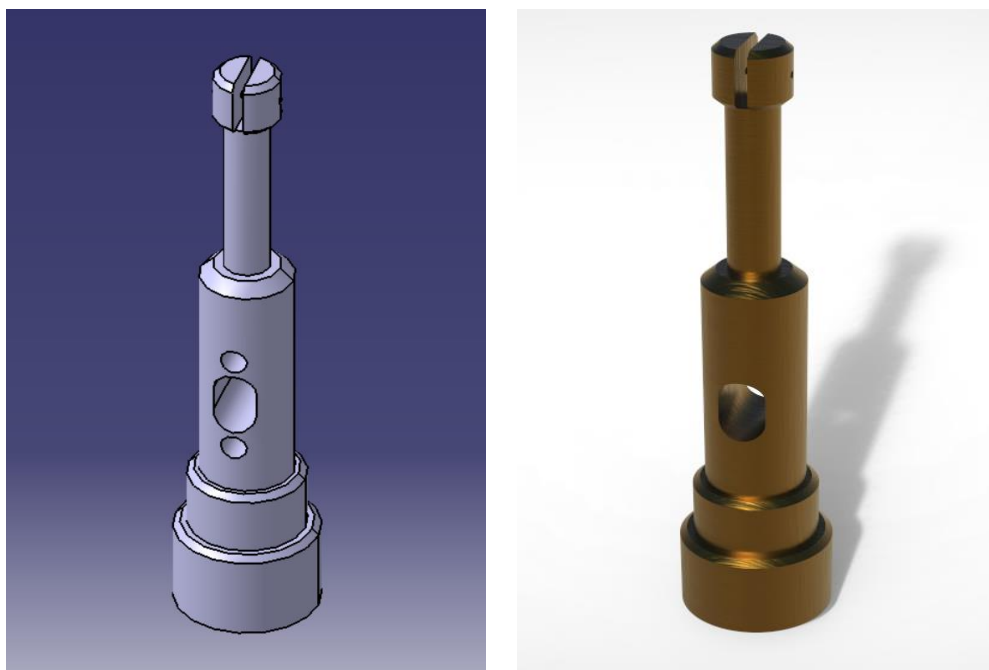


Ilustración 4.9: Central Pillar. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Si bien el desarrollo de este pilar principal nos recuerda a varios de los que ya se han mostrado hasta el momento, con la construcción de varios cilindros consecutivos y los correspondientes *chamfers* en los bordes, llama la atención la elaboración de varios *pockets* transversales a diferentes alturas y de diversas formas, lo que nos habla de la versatilidad de esta herramienta.

El renderizado, como es habitual, se ha realizado en latón.

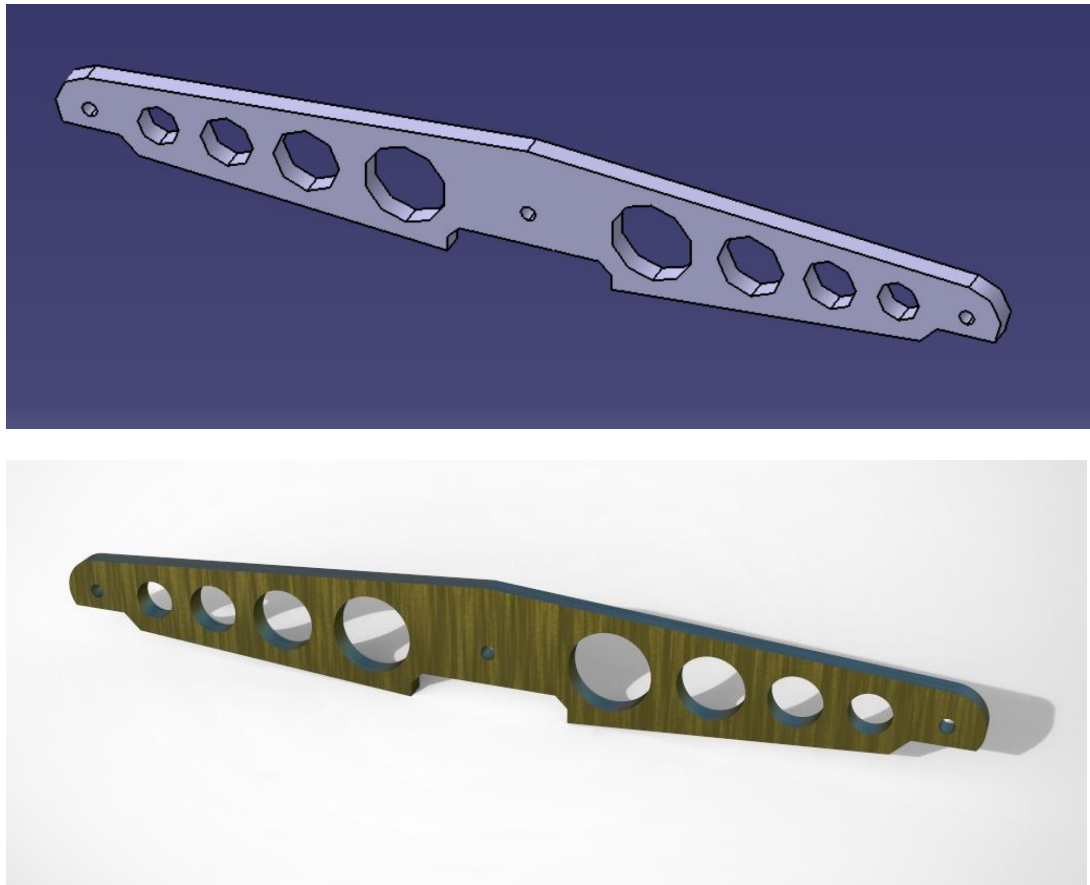


Ilustración 4.10: Tumbler Plate. Resultado CATIA (arriba) y tras renderizado (debajo)

Si bien la pieza del balancín es sencilla a primera vista, un *pad* de escaso grosor sobre el que se han aplicado varios *pockets*, es interesante reseñar que, dado que la distribución de los agujeros es simétrica, solo se ha realizado la mitad de ellos, obteniendo los restantes mediante la herramienta *mirror*, ahorrándonos así un trabajo sustancial.

En esta pieza, si observamos detenidamente el renderizado, es fácil distinguir la textura aplicada sobre el latón de *brushed* o “cepillado”.

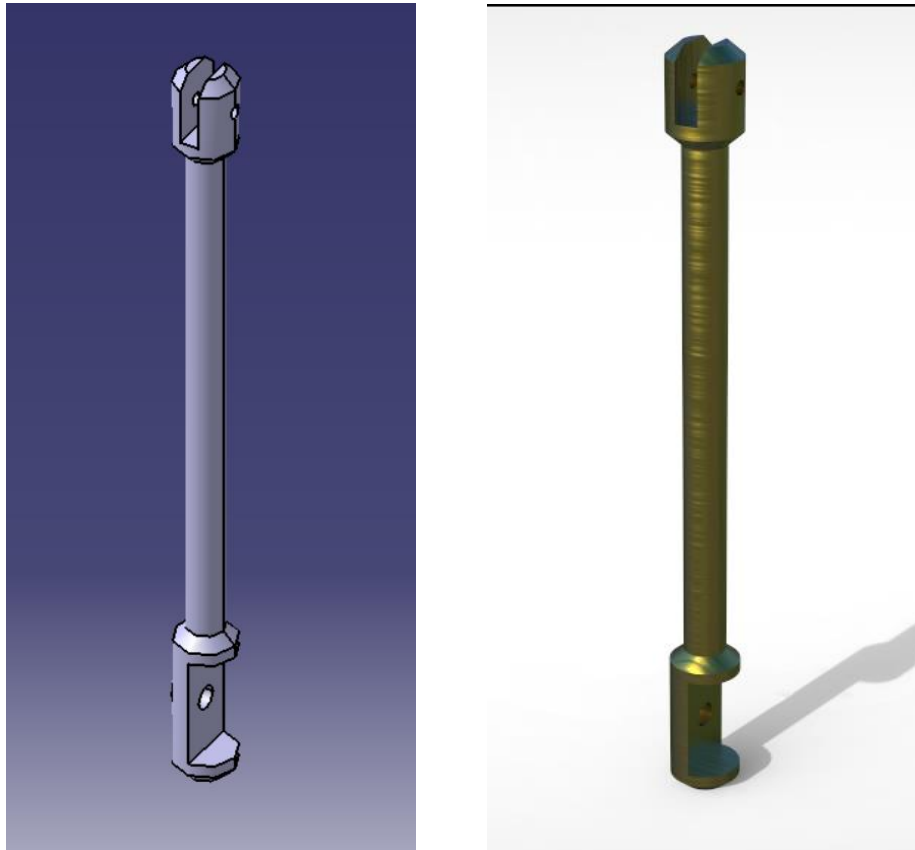


Ilustración 4.11: Long Connection Rod. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Nuevamente, nos encontramos con una pieza de apariencia inicialmente sencilla, formada por cilindros y sobre las que se han aplicado algunos *pockets*. No obstante, nos permitiremos destacar el que ha sido realizado en el cilindro inferior, que ha cortado transversalmente la pieza. En estos casos solo hace falta determinar la profundidad del corte (en este caso, hasta la mitad de la pieza), pero no es necesario fijar deliberadamente la dimensión externa del rectángulo que se ha utilizado para realizar el *pocket*.

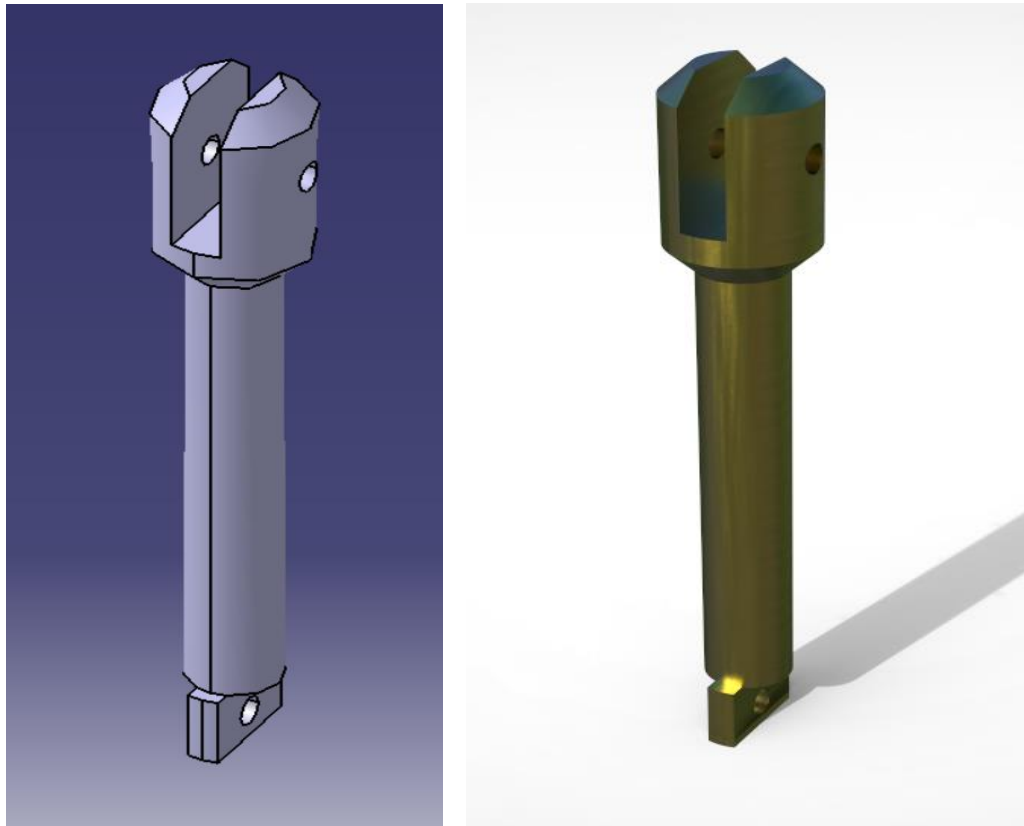


Ilustración 4.12: Power Piston Connection Rod. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

En este eje, parecido al anterior, destacaremos la parte situada en la zona inferior, que nos permite distinguir la flexibilidad del programa a la hora de hacer un *pad* a partir de una superficie ya creada, sin importar que este sobresalga de esta última.

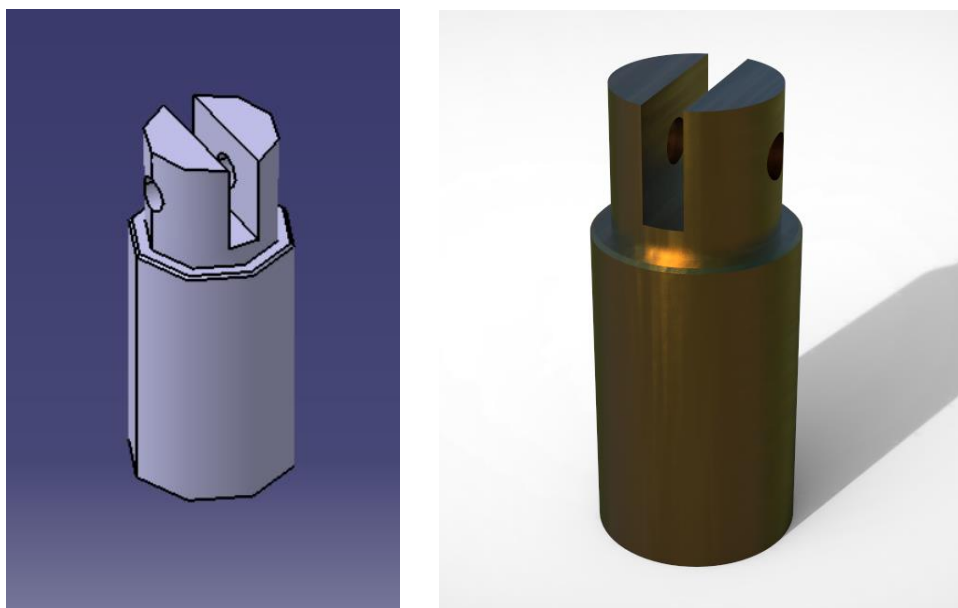


Ilustración 4.13: Power piston. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

La pieza mostrada aquí es el pistón, una pieza fundamental en cualquier motor, que se desplaza en un movimiento alternativo dentro del cilindro de compresión. Es de destacar como la ranura superior debe encajar con la lengüeta que reseñamos anteriormente en el eje previo, alineando a su vez los agujeros, por los que se hará pasar un eje sencillo.

4.1.4. - VOLANTE DE INERCIA

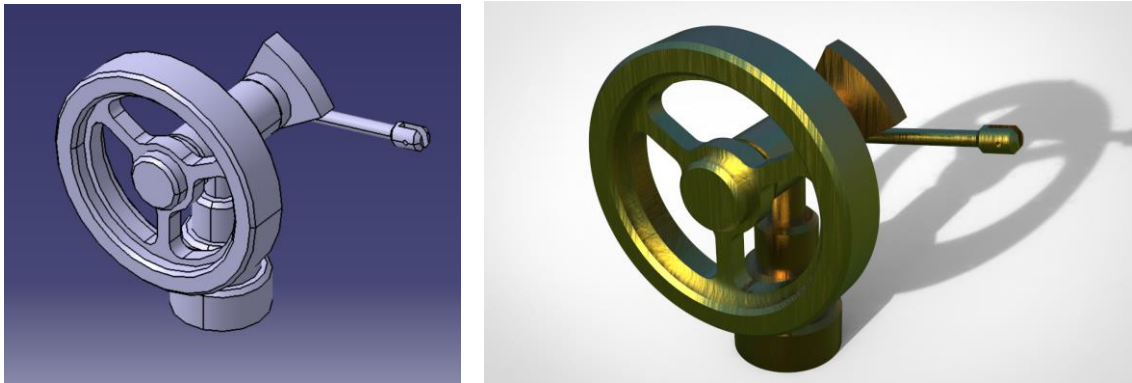


Ilustración 4.14: “Volante de inercia”. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Mostramos aquí otra parte fundamental del motor Stirling, y que se puede encontrar prácticamente en cualquier motor mecánico de baja categoría: el volante de inercia.

La rueda mostrada acompañará al movimiento cíclico del motor, acumulando energía cinética y permitiéndole mantener el movimiento de manera inercial.

En la selección de piezas de esta sección del motor omitiremos el eje transmisor, ya que se trata sencillamente de un cilindro simple.

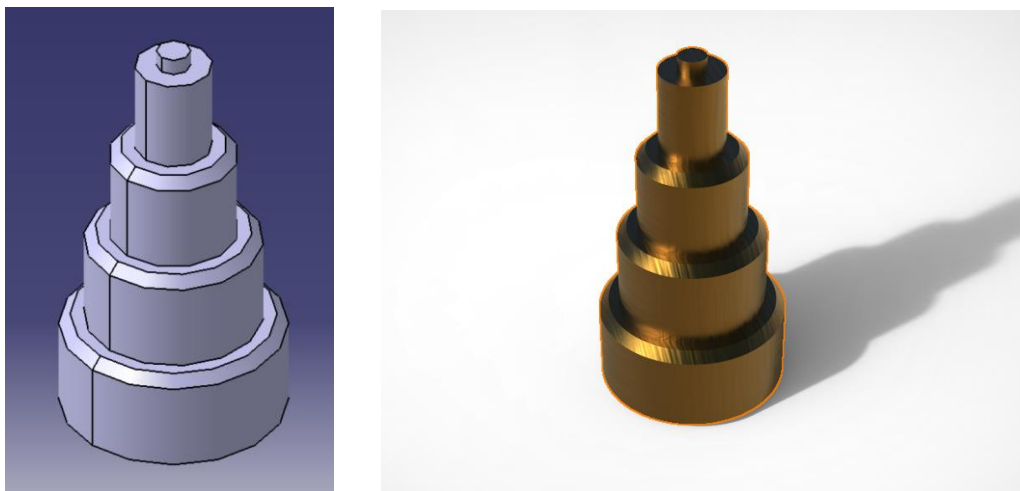


Ilustración 4.15: Main Shaft Support Pillar. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Pilar de soporte, con la composición habitual ya conocida de cilindros consecutivos, con *chamfers* para lograr un embellecimiento. Como el resto de piezas que funcionan como pilares de soporte, está agujereado en su parte inferior para poder atornillarlo a la base.

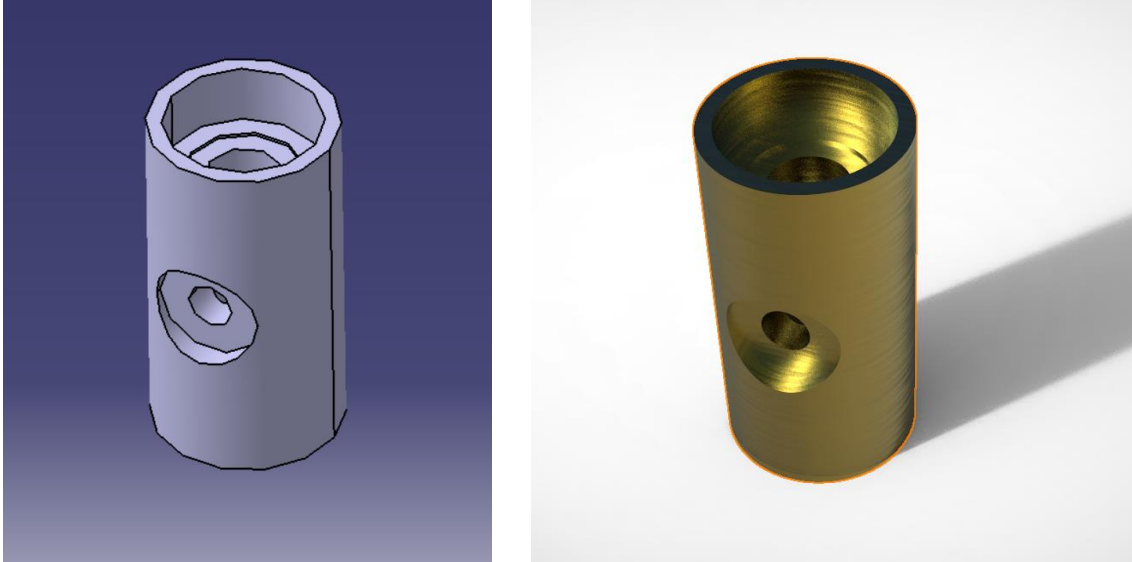


Ilustración 4.16: Main shaft bearing housing. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Soporte para el eje. Esta pieza encaja por el agujero realizado en su lateral con el pilar anteriormente descrita, y actúa de soporte para un eje que transmitirá el movimiento del motor a la rueda de inercia.

Esta pieza presenta algunas particularidades interesantes en su elaboración. Como puede verse, se han realizado varios *pockets* consecutivos, uno después de otro, a diferentes profundidades en uno de los extremos de la pieza. El otro extremo presenta los mismos agujeros concéntricos, pero estos han sido replicados con *mirror*. Así mismo, para el agujero lateral, dado que las cotas para realizarlo estaban dadas desde el borde exterior, se ha colocado un plano a la distancia del radio respecto del eje central, y se han obrado los *pockets* hacia dentro desde ese plano.

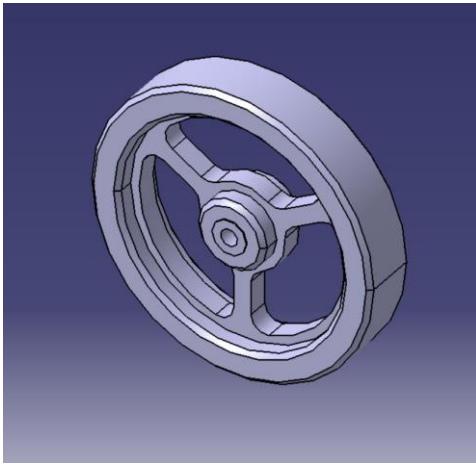


Ilustración 4.17: Flywheel. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

No podía omitirse en este desgranado de las piezas del motor Stirling la rueda de inercia, una pieza icónica en su diseño, y de las de mayor complejidad que podemos encontrar en los planos presentados.

Sin embargo, la mayor dificultad que encontramos es en el cálculo y establecimiento de algunas medidas. Sin embargo, respecto a su diseño último, su fabricación se realizó mediante varios *pads* a diferentes alturas: un disco inicial, al que luego se le realizarían los cortes observables en la pieza, un nuevo *pad* para el borde exterior y un último para la sección central.

Para su renderizado, si bien se ha usado latón, tal y como está indicado en los planos para la mayoría de las piezas, en este caso se le ha aportado un lustre más brillante y vistoso.

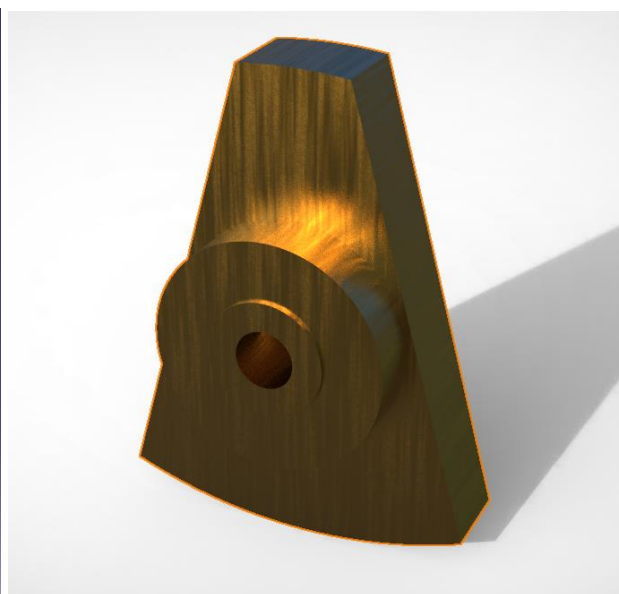
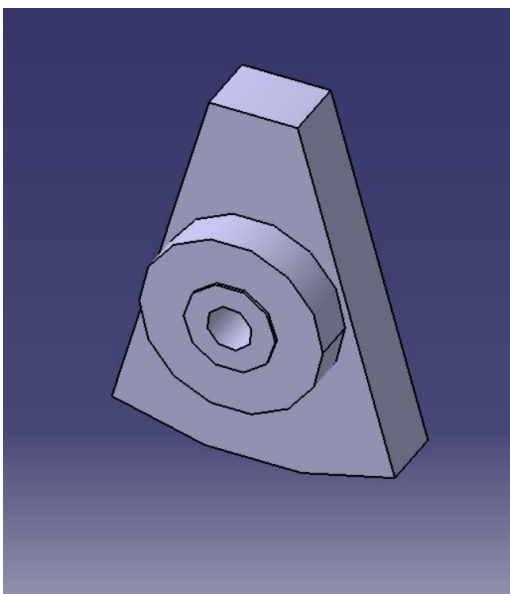


Ilustración 4.18: Crank. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

La pieza mostrada es la “manivela”, una pieza que transmite el movimiento cíclico del motor de forma asimétrica, acompañando los desplazamientos sucesivos del pistón y el desplazador.

4.1.5. - CILINDRO PRINCIPAL

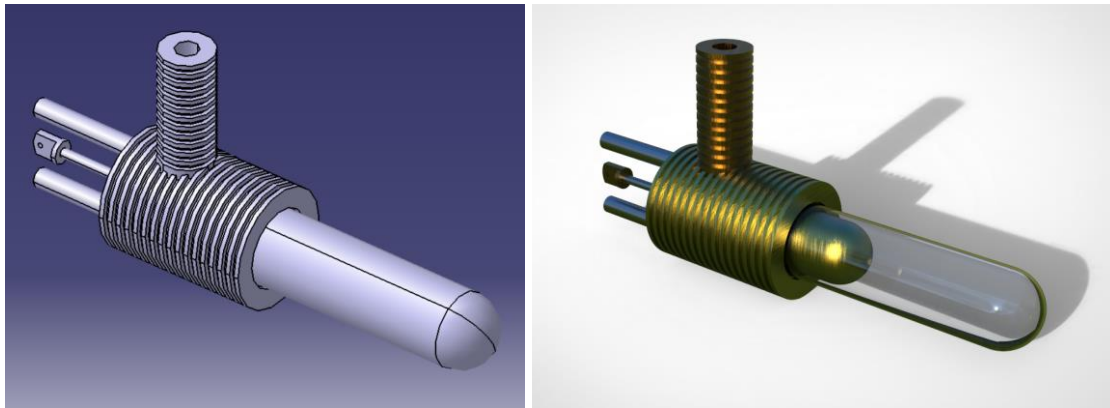


Ilustración 4.19: “Cilindro Principal”. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Mostramos aquí la última sección restante del motor Stirling, una parte fundamental, pues es donde tienen lugar los principales movimientos de expansión y compresión del gas.

Podemos comprobar cómo, con esta sección, cerramos el “círculo” que compone el motor; las dos piezas cilíndricas posteriores encajan en el pilar principal de la torre de transmisión, afianzándose en este, el cual le sirve de soporte. Así mismo, el pistón anteriormente descrito, enganchado al eje de transmisión, se introduce en un movimiento cíclico alternativo por el orificio superior del cilindro de compresión. Finalmente, el desplazador interno está conectado (fuera de la vista) al eje que se puede ver entre los dos soportales de la torre, y que transmitirá un segundo movimiento cíclico alternativo al eje que estaba conectado a la manivela de la sección anterior.

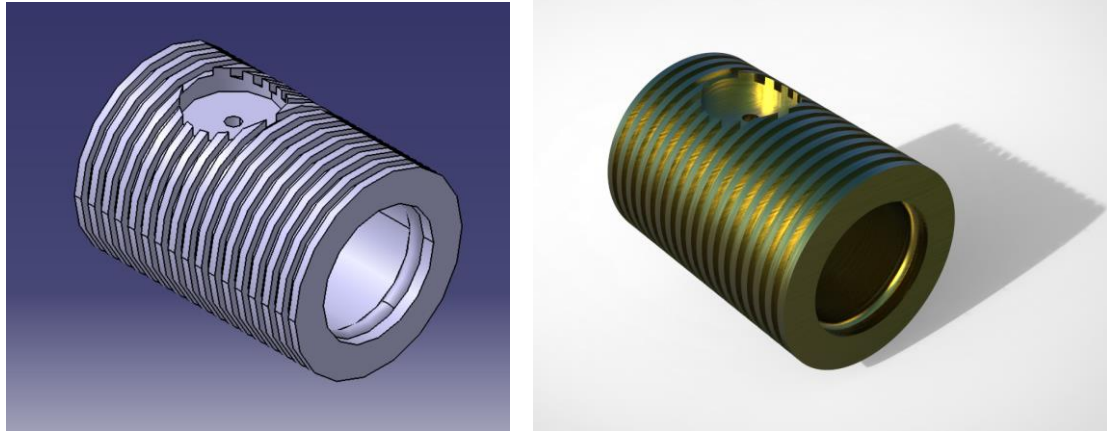


Ilustración 4.20: Main Cylinder. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Una de las piezas más llamativas por su diseño. Para la elaboración del ranurado exterior, en contra de lo que pueda parecer, se realizaron en primer lugar dos *pads*, con las medidas mínimas y máximas de los cilindros menor y mayor, según aplicamos las medidas de las ranuras; y a continuación, se aplicó un *Rectangular Pattern* en una sola dirección, para replicar estos cilindros alternativos, consiguiéndose así el efecto de ranurado. También se le ha realizado un agujero lateral, como ya se ha explicado previamente, colocando un plano secundario generado a la altura del radio exterior, y aplicando un *pocket* transversal desde ese plano.

Por dentro la pieza, una vez que se vació convenientemente mediante *pockets*, también presenta ranurados. Estos sí están realizados con *pockets* cilíndricos que cortan la pieza; no obstante, lo más interesante resulta que dichas ranuras han sido aprovechadas para colocar unos aros que sobresalen ligeramente de la superficie interior. El objetivo de estos aros es que, al introducir la probeta de cristal, esta quede encajada a presión; esto también permite el ajuste manual de la profundidad a la que quiere introducirse esta.

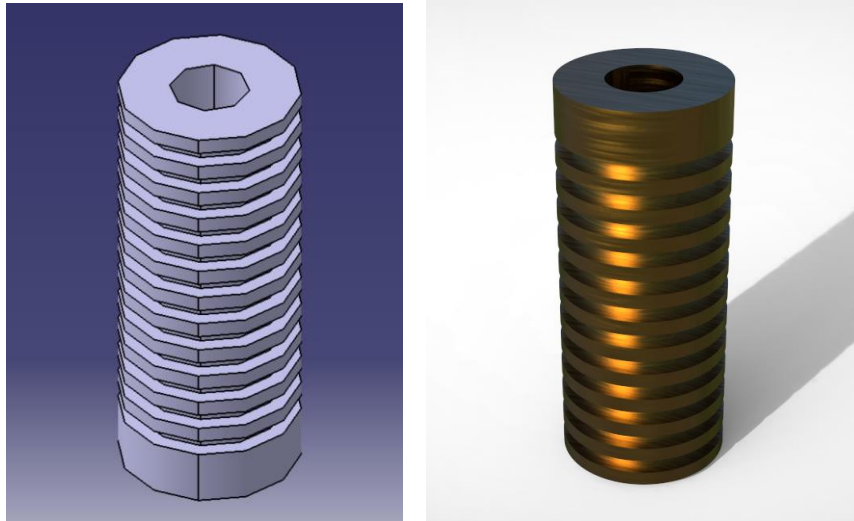


Ilustración 4.21: Power Cylinder. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Esta pieza, el cilindro de compresión dentro del cual se desplaza el pistón en un movimiento vertical alternativo, sigue el mismo proceso de fabricación que el descrito anteriormente para el cilindro principal, estableciendo con dos *pads* las medidas básicas de dos cilindros que luego se han reproducido con *Rectangular Pattern* para conseguir el efecto de ranurado deseado. Hay que denotar que este efecto también podría haberse conseguido con un cilindro macizo, sobre el que se hubiera aplicado un único *pocket* medido, que luego podría haberse reproducido; un nuevo ejemplo de la versatilidad de CATIA.

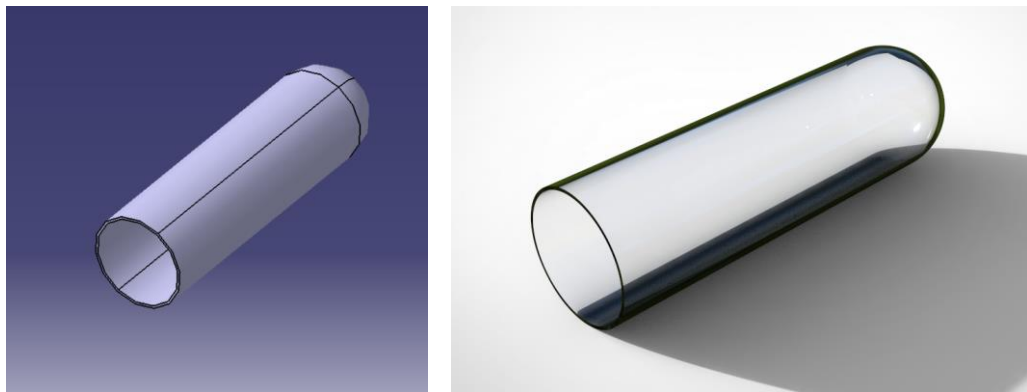


Ilustración 4.22: Test Tube. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

La probeta de cristal se revela como una de las piezas más interesantes en su fabricación; podría hacerse fabricando el cilindro, junto con una cúpula semicircular maciza, que luego podríamos vaciar con *Shell*. Sin embargo, en nuestro caso hemos optado por definir en un sketch la mitad de su perfil, dibujando solo su espesor, y a continuación, revolucionarla sobre el eje central con *Shaft*, obteniendo así la pieza en un solo paso.

También es increíblemente interesante su renderizado, que ha sido realizado aplicando a la pieza el material “cristal” (uno básico dentro de la amplia selección de esta categoría). Este material ofrece la característica de transparencia; como podíamos observar en la imagen general de este apartado, podemos distinguir el desplazador de latón dentro de la probeta de cristal.

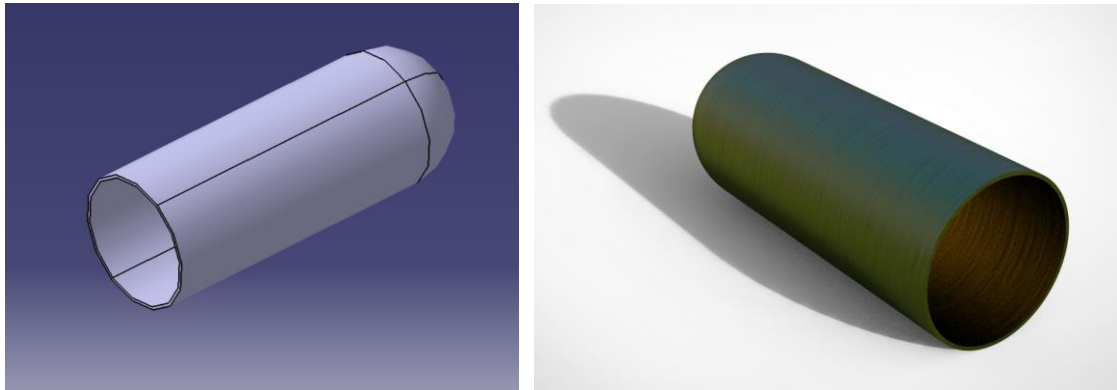


Ilustración 4.23: Displacer. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Y precisamente con el desplazador que hemos mencionado previamente finalizamos esta sección. Si bien la construcción de la pieza se realiza exactamente igual a cómo se fabricó la probeta, ajustando las medidas, es interesante el contraste al elaborar el renderizado, en este caso aplicando latón.

4.1.6. - MOTOR STIRLING

Ponemos punto final a este apartado mostrando en su totalidad el motor Stirling al completo, con todas sus piezas terminadas y convenientemente montadas en conjunto. Pueden observarse algunas piezas menores que han sido omitidas en los párrafos anteriores, por simpleza o por tener diseño similares o parecidos a otros ya descritos.

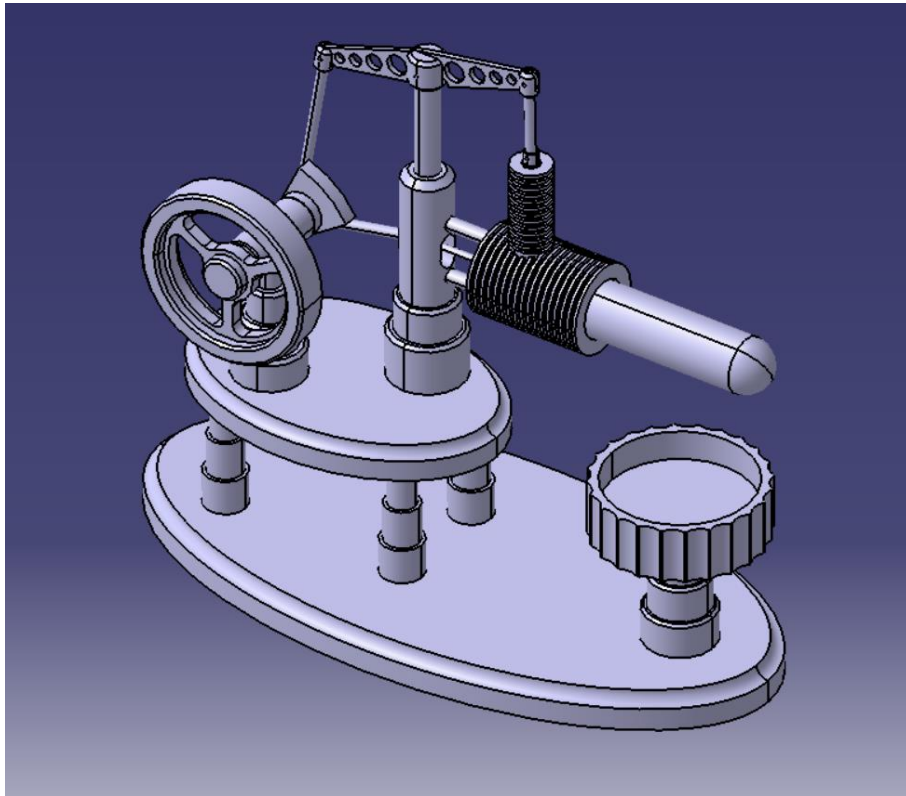


Ilustración 4.24: Motor Stirling; vista general. Resultado CATIA

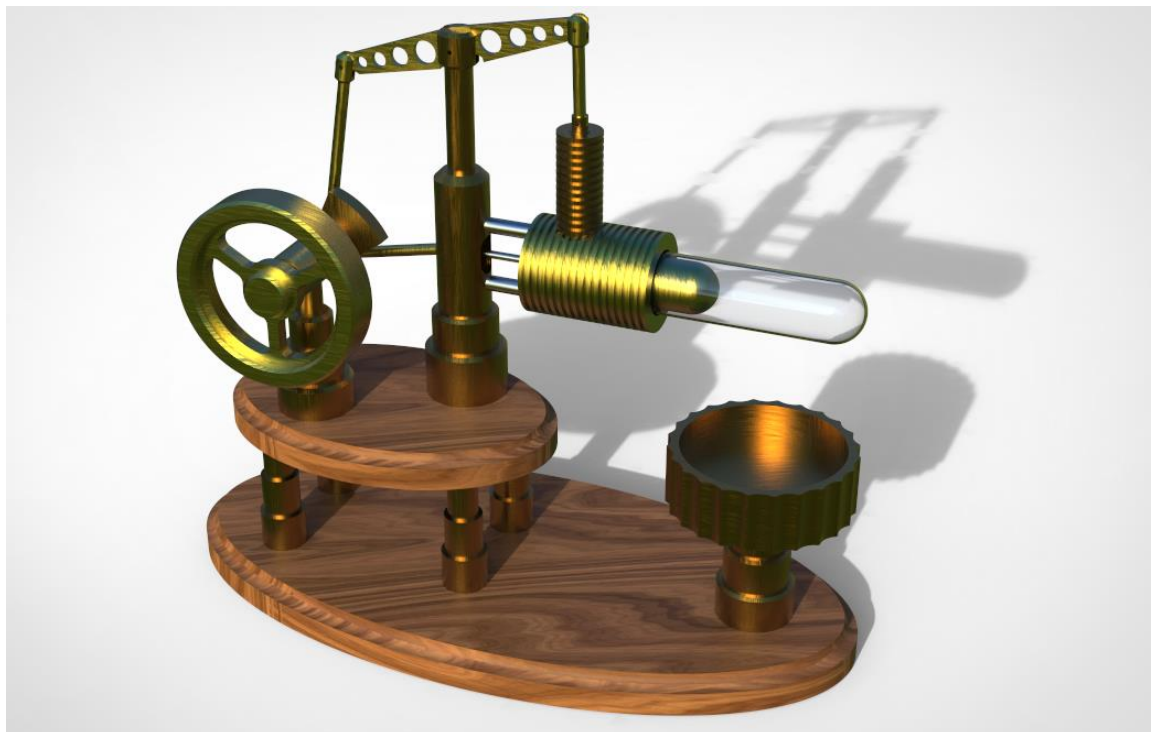


Ilustración 4.25: Motor Stirling; vista general. Tras renderizado

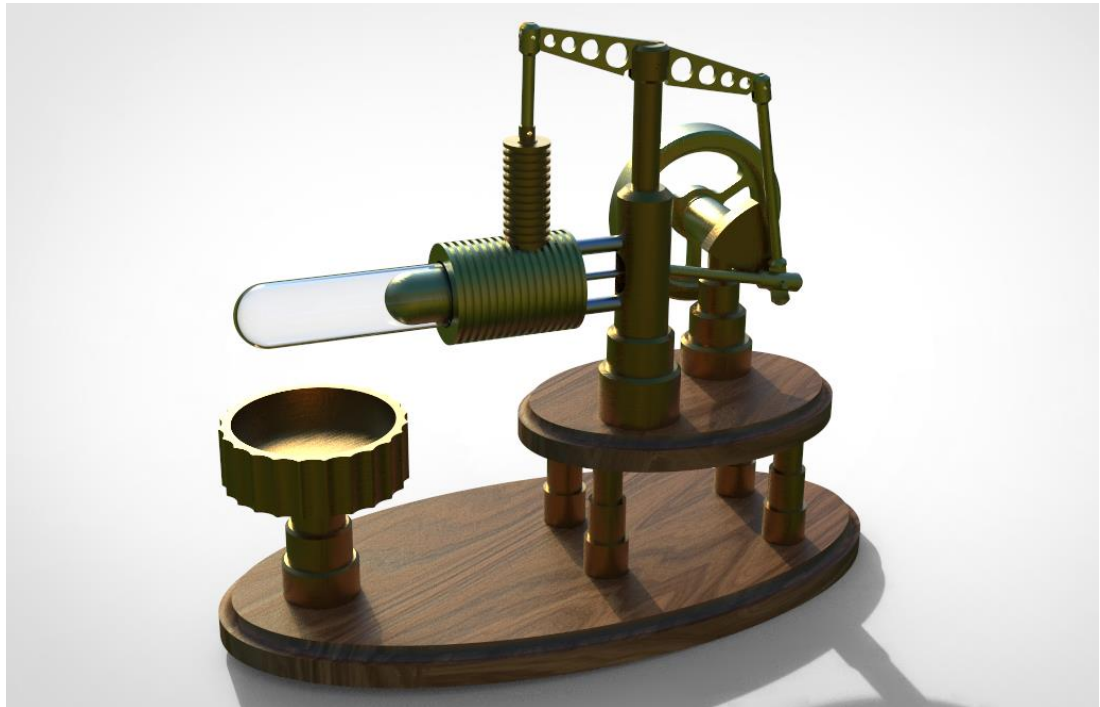


Ilustración 4.26: Motor Stirling; vista general (posterior). Tras renderizado

4.2. - Motor Webster

Procedemos a continuación a mostrar el proceso de modelado de las piezas del motor Webster. Del mismo modo que se ha realizado con el motor Stirling, se ha dividido el motor en varias secciones o partes, para dotar de un cierto orden al proceso.

Así mismo, tal y como se realizó anteriormente, se adjuntarán junto a las imágenes de los resultados en CATIA, esas mismas piezas tras haberseles aplicado el proceso de renderizado en Keyshot.

Del mismo modo que se hizo en el apartado anterior, se han omitido aquellas piezas que resulten poco interesantes o sean repetitivas, aunque por supuesto, todas aparecerán en las imágenes generales del motor.

4.2.1. – BASE

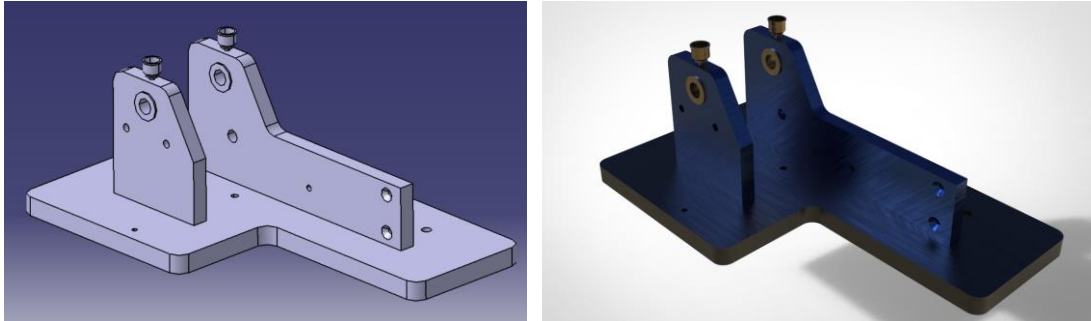


Ilustración 4.26: “Base”. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Esta parte básica del motor sirve como soporte para el resto de piezas principales, que se apoyarán sobre esta estructura.

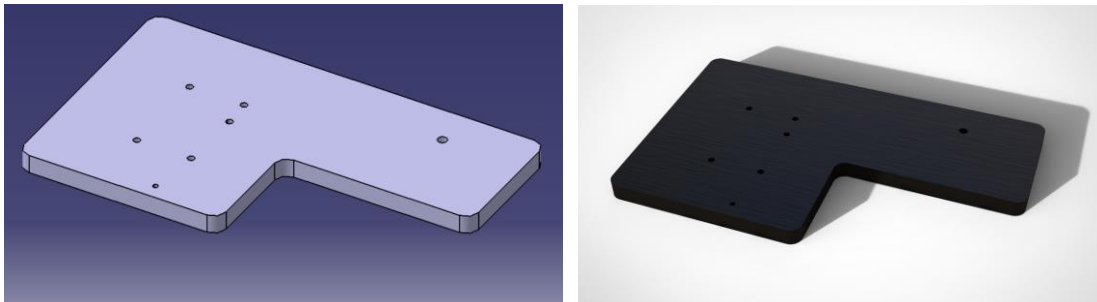


Ilustración 4.27: Base plate. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

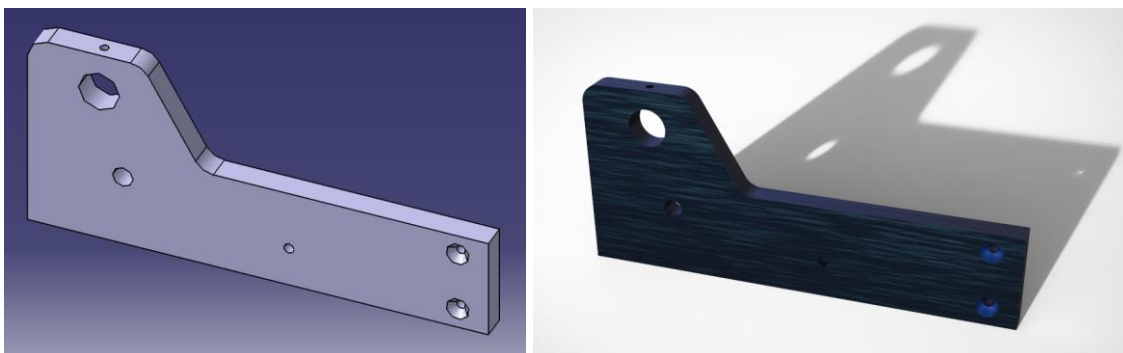


Ilustración 4.28: Side frame. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

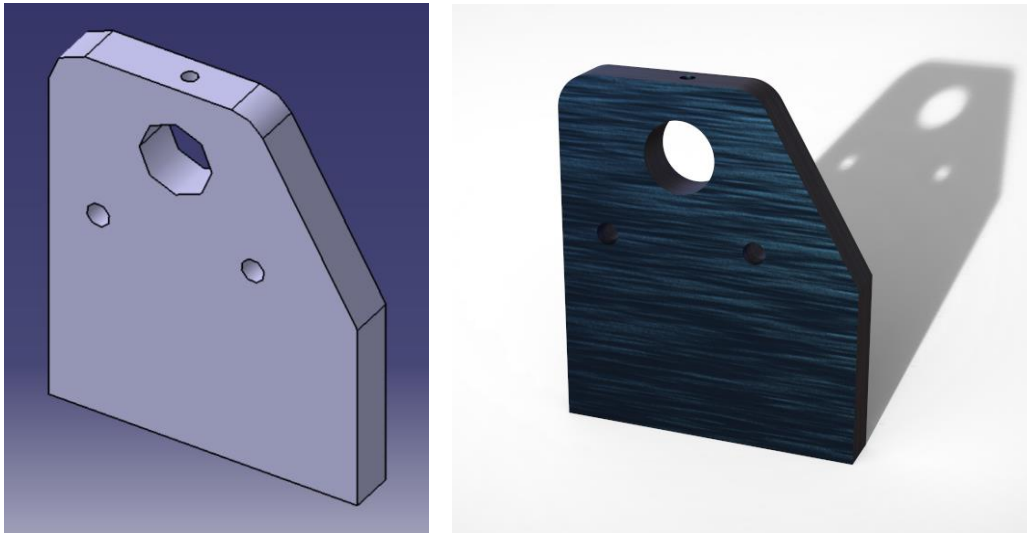


Ilustración 4.29: Crankshaft support. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Las tres piezas mostradas, correspondientes a la placa base y a los soportales verticales, se han elaborado con el mismo procedimiento: se han realizado *pads* a una serie de sketches (realizados inicialmente con todas las esquinas angulosas), para posteriormente aplicar la herramienta de *Edge Fillet* a las esquinas que lo requirieran, siguiendo los radios especificados. Los agujeros más grandes han sido realizados con *pockets*, mientras que los pequeños, pensados para tornillos, han sido creados con la herramienta *Hole*. Así mismo, muchos de estos últimos han sido reproducidos mediante un *Rectangular Pattern*, puesto las medidas estaban dadas referenciadas con respecto a otro de los agujeros, facilitando establecer las distancias desde estos.

Para el renderizado, se ha decidido seguir las indicaciones estipuladas en los planos. Se ha imprimido aluminio como material para las tres piezas, con coloración negra para la base y azulada para los soportales, y es especialmente notable y visible el efecto de cepillado que se ha aplicado como textura a las superficies.

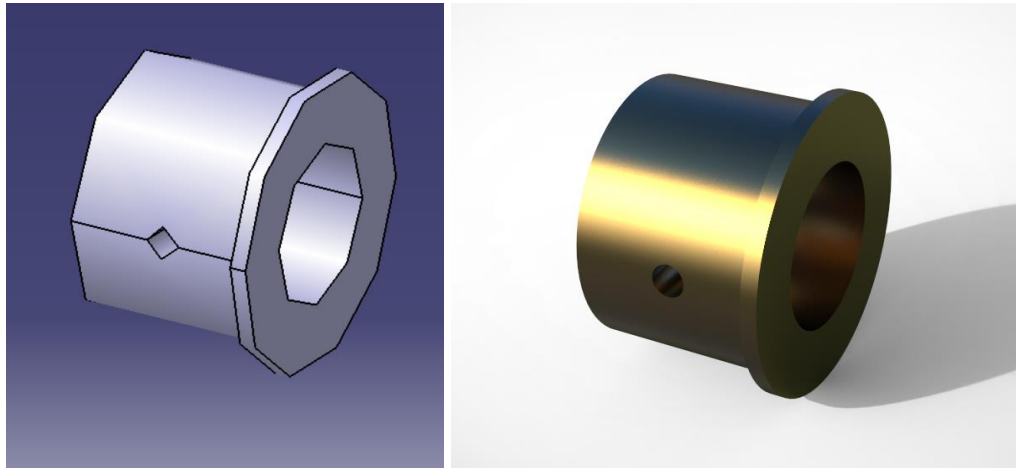


Ilustración 4.30: Main bearing. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

La pieza anterior es un elemento de ajuste que se ha introducido dentro de los agujeros más grandes de los soportales verticales. Por estos agujeros se hará pasar un eje transmisor, y estas piezas funcionan como un intermediario entre ambos elementos, permitiendo ajustar el diámetro a aquel del eje, sin transmitir rozamiento a las propias placas de los soportales. Así, en caso de desgaste, resulta mucho más sencillo cambiar solo estas piezas.

Resulta interesante hacer mención del pequeño agujero lateral. En el resultado obtenido en CATIA, este agujero parece prismático, cuando en realidad es circular. Esto se debe a que, cuanto más pequeñas son las dimensiones de un elemento, más dificultades tiene este programa para representar curvatura, la cual, en última instancia, no son sino una serie de infinitas rectas. Al tratar en escala de milímetros, CATIA no es capaz de aplicar suficientes rectas, quedando así ese aspecto cuadrado. Sin embargo, al realizar sobre la pieza el renderizado, siendo Keyshot un programa orientado a la visualización mucho más potente, este problema queda subsanado. Esto denota una vez más la importancia que tiene el renderizado a la hora de presentar un resultado, especialmente en el ámbito ingenieril.

Respecto a esta última especificación, este renderizado se ha realizado en bronce, facilitando su visualización con respecto a las piezas de soporte.

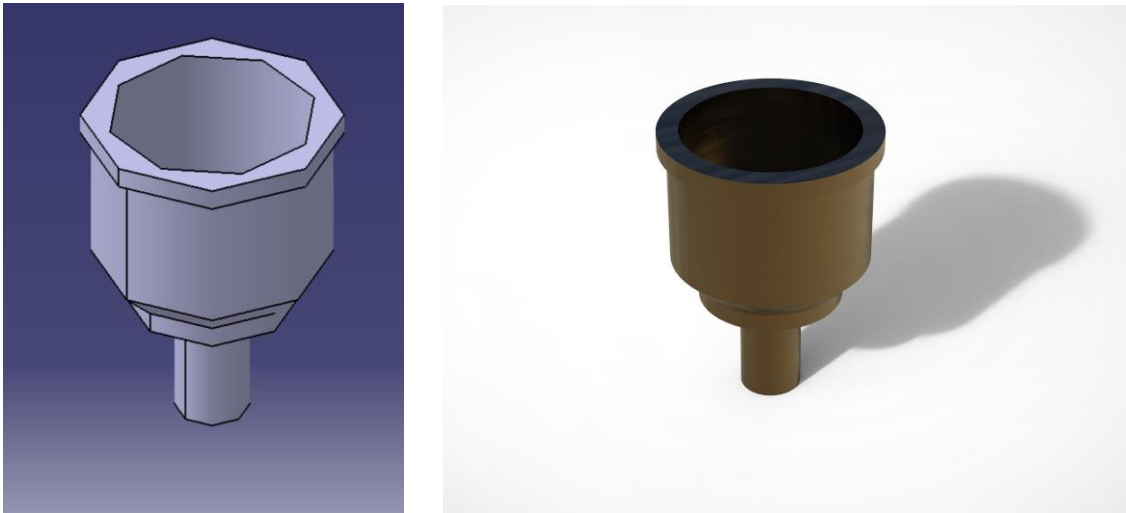


Ilustración 4.31: Crank Oilier Cup. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Esta última pieza que se ha añadido, si bien no conforma una parte intrínseca del motor, tiene una importancia capital: funciona como una copa en la que verter aceite, que fluye lentamente hacia juntas o partes del motor en las que se espera un elevado nivel de rozamiento entre piezas. Este aceite lubrica estas partes conflictivas, reduce el rozamiento, permite que el motor funcione de forma suave y eficaz, y disminuye el desgaste que sufren las piezas en conflicto.

En esta pieza también puede verse de forma patente, en la abertura superior, el efecto de geometría que sufre CATIA en las curvas a escalas muy pequeñas.

Se le ha realizado un renderizado sencillo, en latón.

4.2.2. - CILINDRO PRINCIPAL

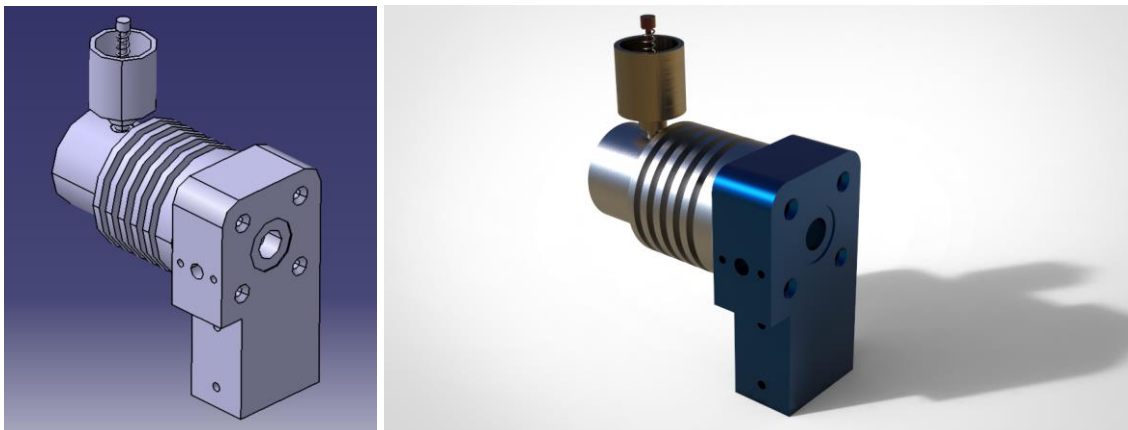


Ilustración 4.32: “Cilindro principal”. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Esta parte del motor incluye el cilindro de compresión dentro del cual realizará su movimiento alternativo el pistón. Así mismo, tal y como se comentaba anteriormente, este es un caso en el que se espera un gran rozamiento entre las piezas, por lo que se ha añadido una copa para introducir pequeñas cantidades de aceite dentro del sistema. Dado que este diseño es muy parecido al anterior, no se mostrará entre las piezas de referencia. Es cierto, no obstante, que en este caso la copa presenta un mecanismo de válvula y muelle, que permite un mayor control del aceite que se filtra a la pieza. Estas piezas no han sido examinadas en profundidad en esta sección, dado que más adelante se hablará de piezas de forma similar en otros sectores del motor.

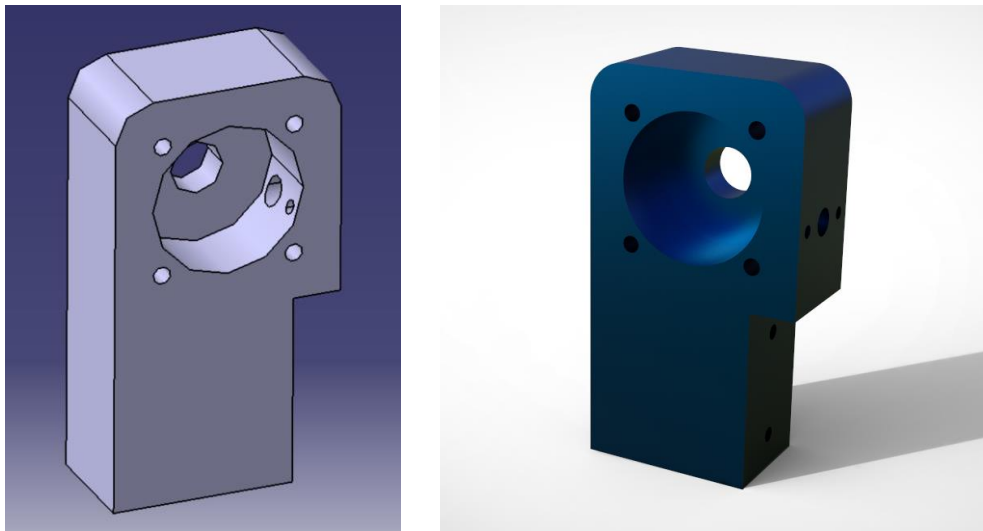


Ilustración 4.33: Cylinder Head Frame. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Esta pieza nos recuerda en su proceso de elaboración a las piezas iniciales de soporte, lo cual no es de extrañar, puesto que en última instancia se trata de una pieza de construcción con especificaciones para soportar el cilindro principal.

No obstante, para ofrecer una pequeña diferenciación con estas piezas, especialmente al estar en contacto directo con una de ellas, a la hora de realizar el renderizado, también en aluminio, se le ha decidido eliminar el efecto de cepillado, ofreciendo una superficie más lisa y pulida.

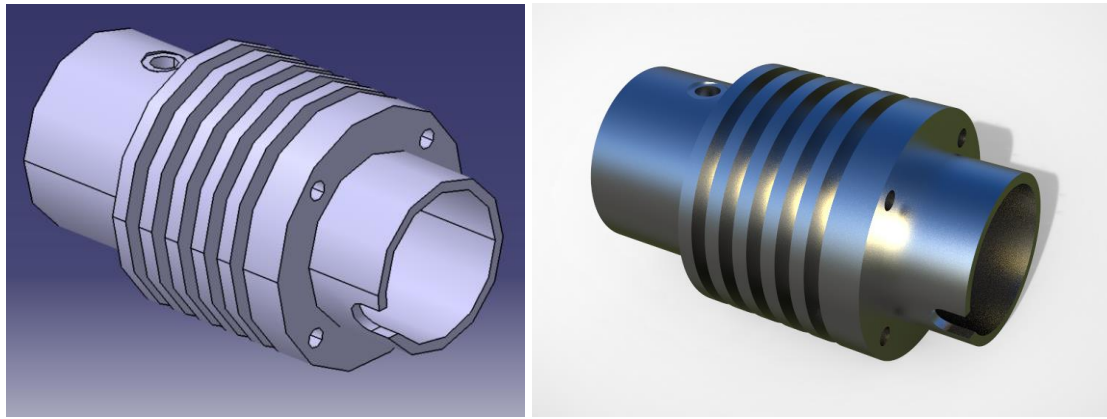


Ilustración 4.34: Cylinder. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Esta pieza se trata del propio cilindro de compresión. Su aspecto puede recordarnos a los cilindros, de características parecidas, que ya fueron examinados en el motor Stirling. Como nota reseñable, para la fabricación de esta pieza, a la hora de conseguir el efecto de ranuras, a diferencia del proceso descrito para el primer motor, en este caso se ha construido en primer lugar un cilindro macizo con las dimensiones del diámetro menor; una vez realizado, se ha realizado un único *pad* cilíndrico con las dimensiones del diámetro mayor, que luego ha sido reproducido con un *Rectangular Pattern*. Nótese que el primer anillo, de mayor envergadura, se realizó independientemente.

En este caso, para reforzar la impresión de que se trata de una pieza robusta, se ha realizado el renderizado con acero pulido.

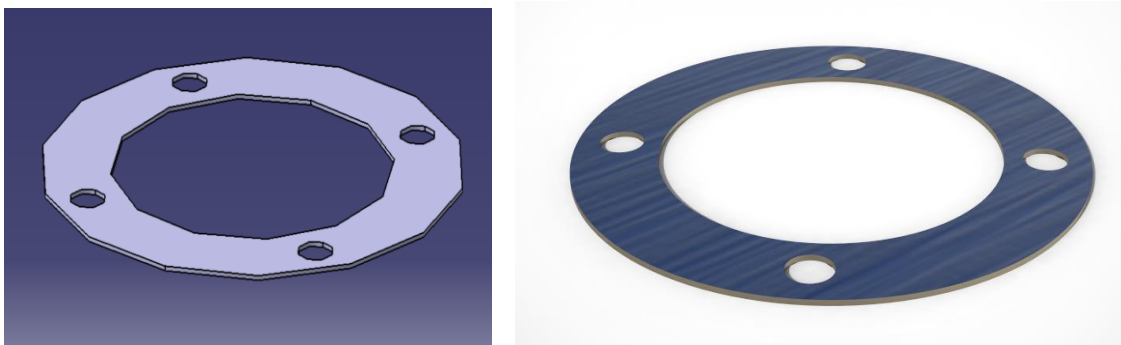


Ilustración 4.35: Head Gasket. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Esta pieza se sitúa entre la pieza de soporte y el cilindro principal de compresión, para actuar como un separador que absorba las fricciones entre ambas piezas.

Si bien se trata de una pieza sencilla, una arandela a efectos prácticos sin demasiada complejidad en su diseño, nos sirve para ofrecer una muestra de cómo Keyshot puede trabajar y realizar sus renderizados sin problemas sobre piezas de espesor reducido.

4.2.3. – PISTÓN

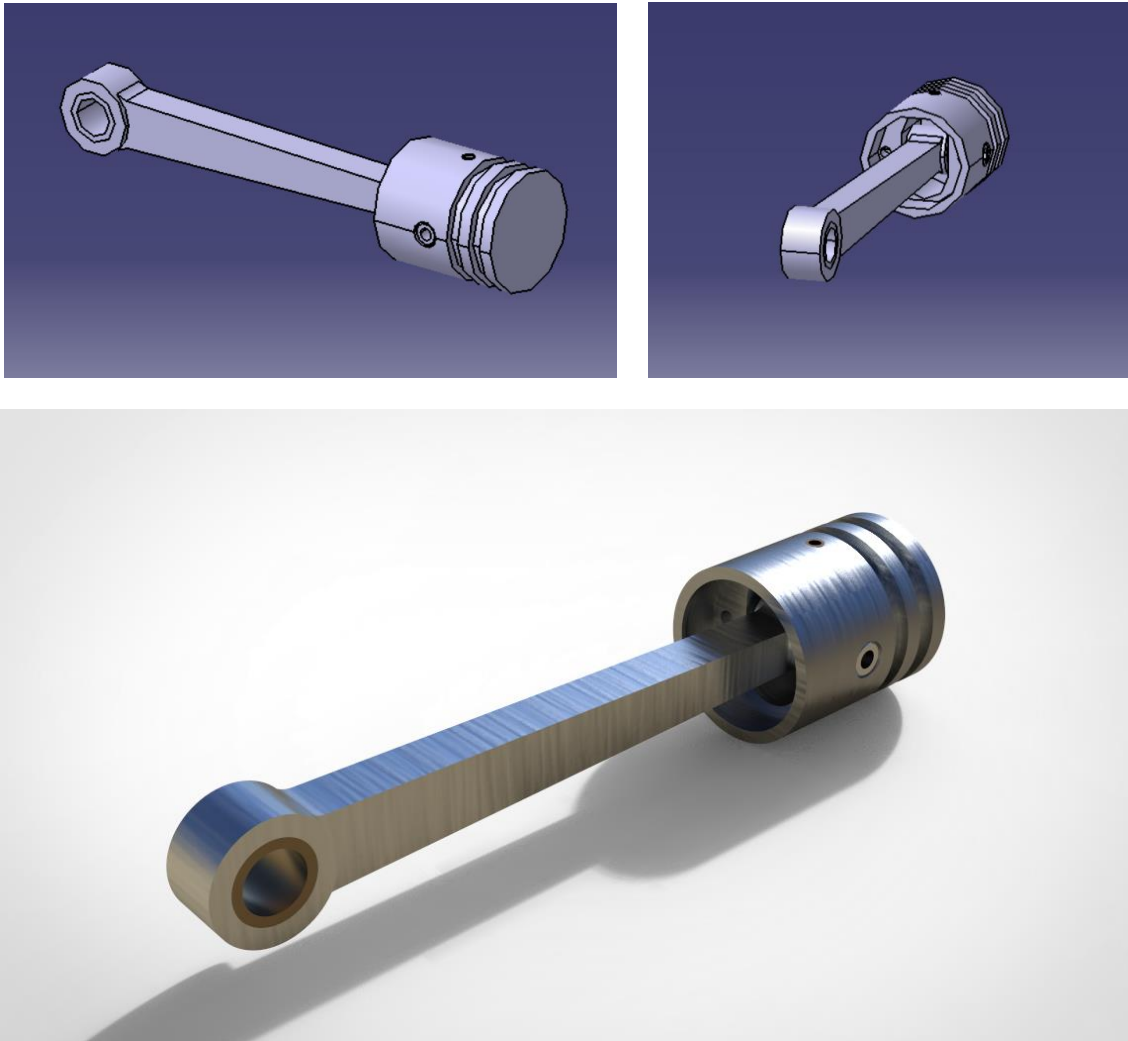


Ilustración 4.36: “Pistón”. Resultados CATIA (dos vistas, arriba) y tras renderizado (debajo)

Esta parte que hemos diferenciado del motor incluye el pistón, una pieza fundamental del motor, y la biela que lo acompaña y que le transmite el movimiento alternativo de avance y retroceso.

También están incluidos en esta sección un elemento de ajuste para la biela, y el eje que engancha internamente a la biela y el pistón, aunque debido a la sencillez de estas piezas se ha decidido omitirlas.

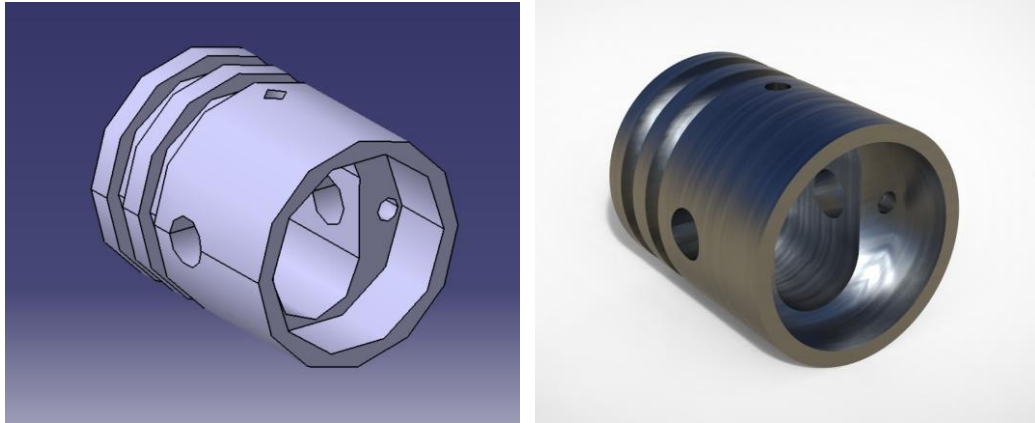


Ilustración 4.37: Piston. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Para la realización del pistón se ha seguido el mismo procedimiento que para el cilindro principal, solo que, en este caso, se ha partido del cilindro de mayor diámetro, y las ranuras se han obtenido restando material con un *pocket*, que luego se ha reproducido con *Rectangular Pattern*. Una vez hecho eso, se han utilizado una serie de *pockets* para la estructura interna y los agujeros laterales.

Para el renderizado se ha empleado aluminio, pero en este caso sin añadirle tintes de color, otorgándole una apariencia más robusta. Puede observarse además un efecto de cepillado, que sigue la curvatura de la pieza.

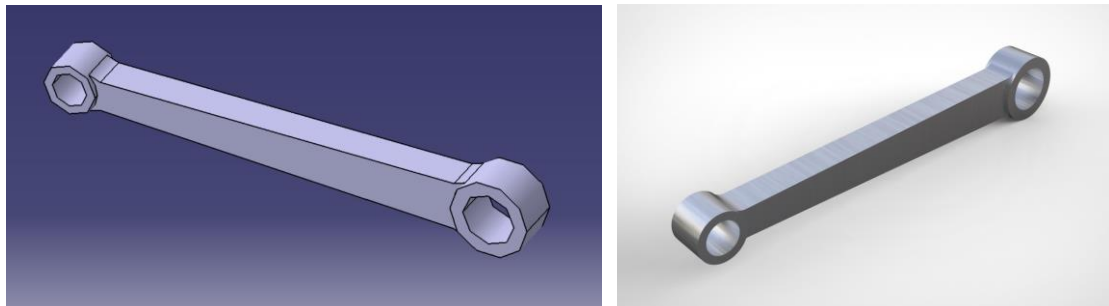


Ilustración 4.38: Connecting Rod. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

La biela es, en última instancia, una pieza sencilla, realizado con dos *pads* a diferentes alturas, como puede observarse, siendo la principal complejidad el correcto establecimiento de las medidas y ángulos. Para su renderizado se ha utilizado un aluminio sin colorear, de forma similar al pistón.

Nótese que por ambos orificios de la pieza se hará pasar sendos ejes, con los que se espera un gran rozamiento. Por ello, en esos agujeros se introducirán elementos de ajuste, para que sean ellos los que sufran el rozamiento, de forma similar a lo descrito en el primer apartado de las piezas base.

4.2.4. - CAJA DE VÁLVULAS

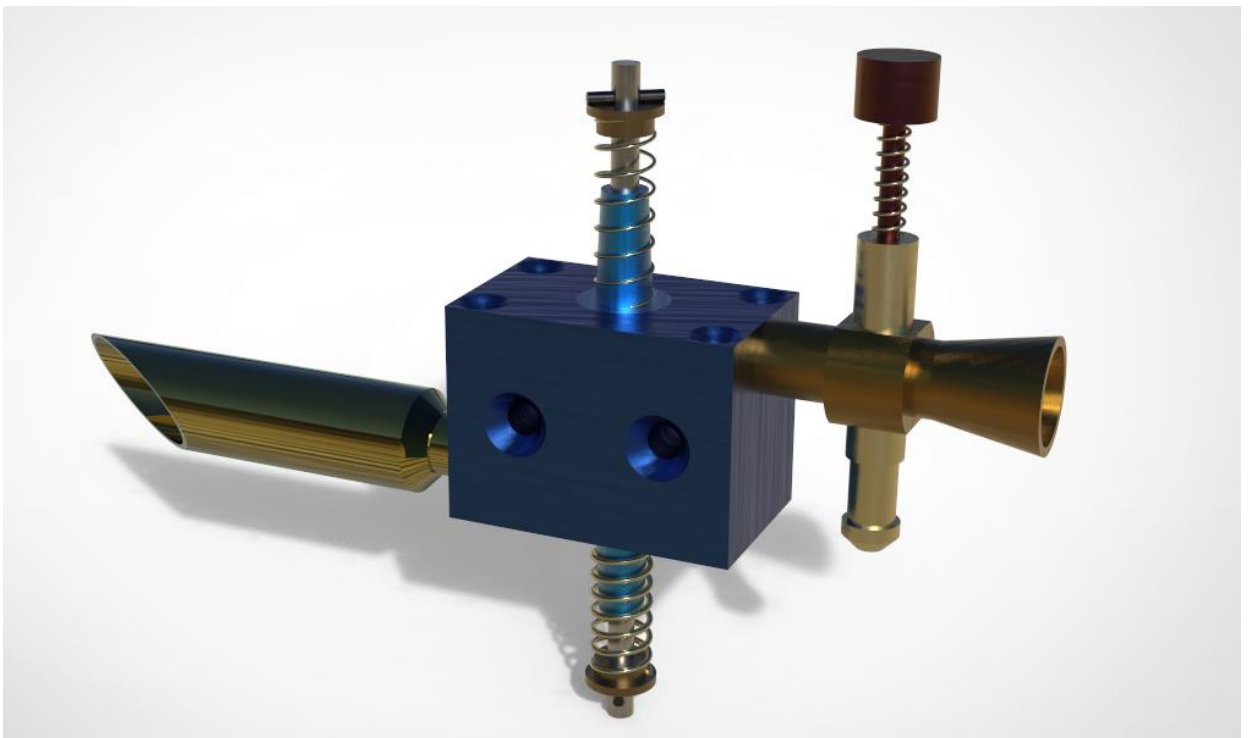
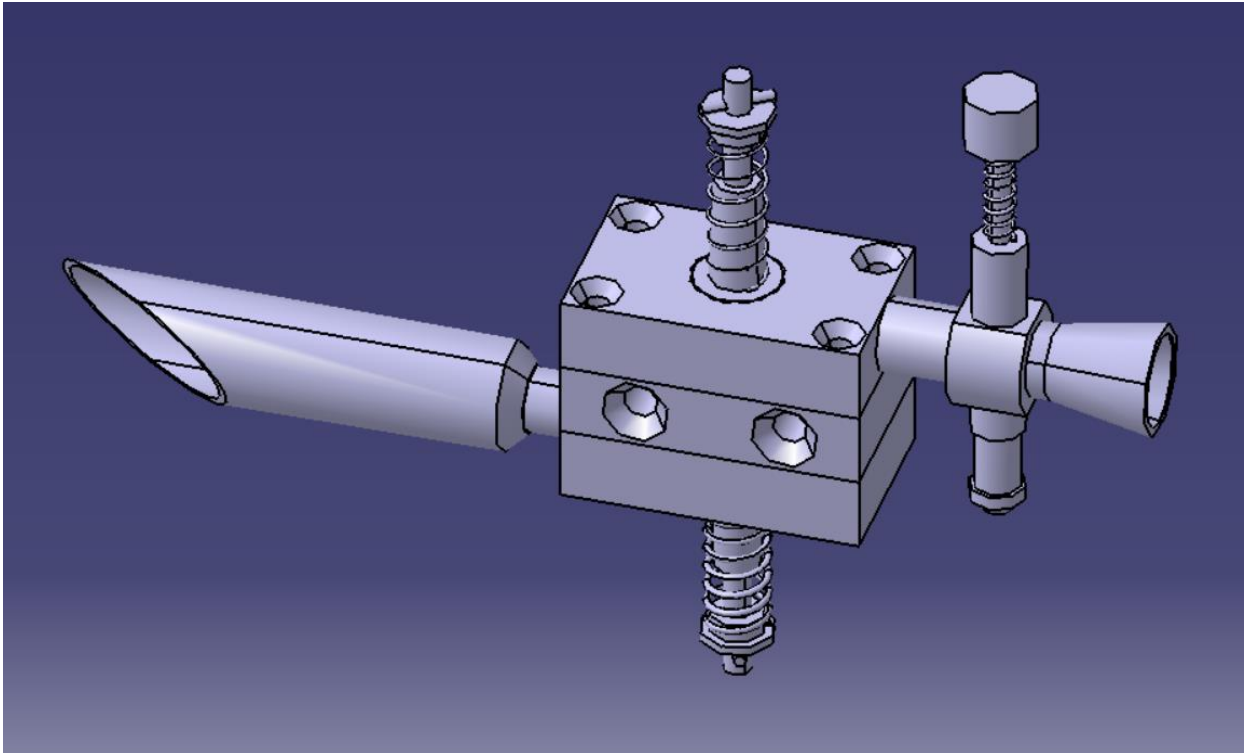
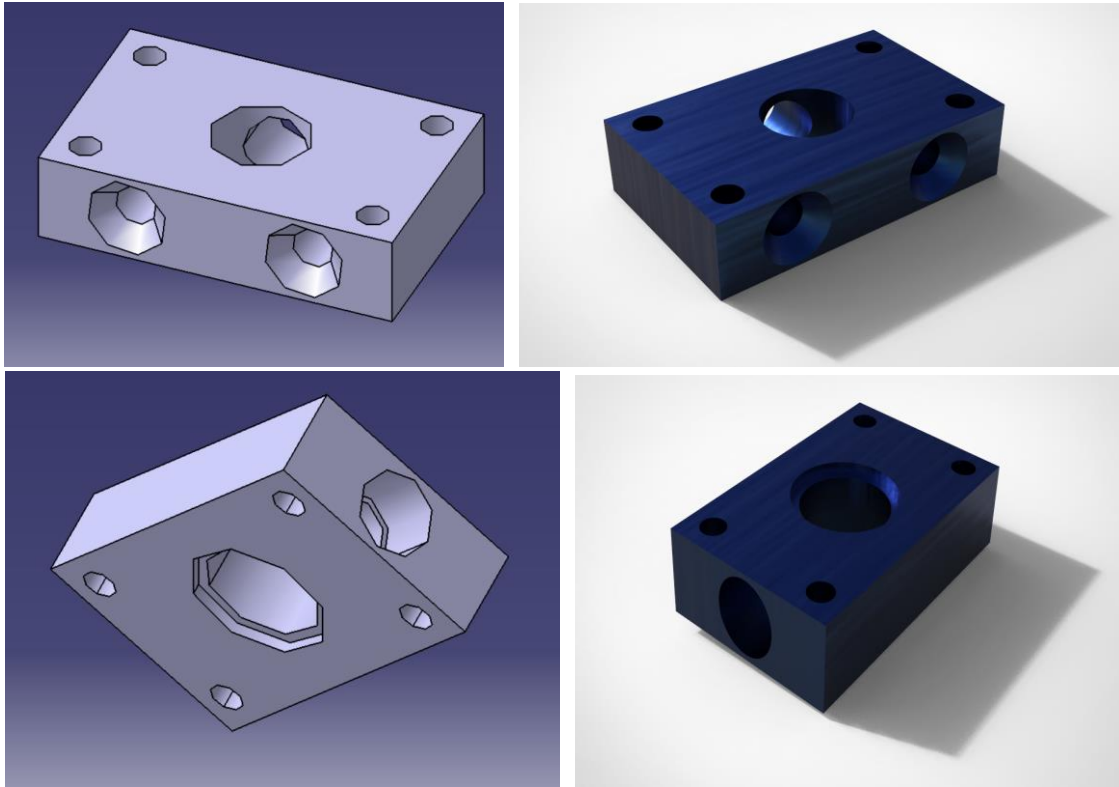


Ilustración 4.39: “Caja de válvulas”. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Esta sección del motor presenta algunas de las piezas con los diseños más interesantes. Una pieza clave, ya que, al tratarse de un motor de combustión interna, tendremos que lidiar con la introducción de combustible y la expulsión de los gases que se producirán.



*Ilustración 4.40: Valve Block (arriba) y Exhaust / Intake Block (debajo).
Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)*

La caja central está conformada por la unión de tres piezas cúbicas, muy parecidas entre sí, siendo la superior y la inferior prácticamente iguales, cambiando solo la orientación de la salida de gases.

Para reforzar la sensación de tratarse de una única pieza, se les ha realizado a las tres el mismo tratamiento de renderizado, con aluminio coloreado de tono azul. Al ser las tres piezas de las mismas dimensiones, y con la misma aplicación de material, color y textura, el resultado ofrecido por Keyshot hace parecer que se trata de una pieza única.

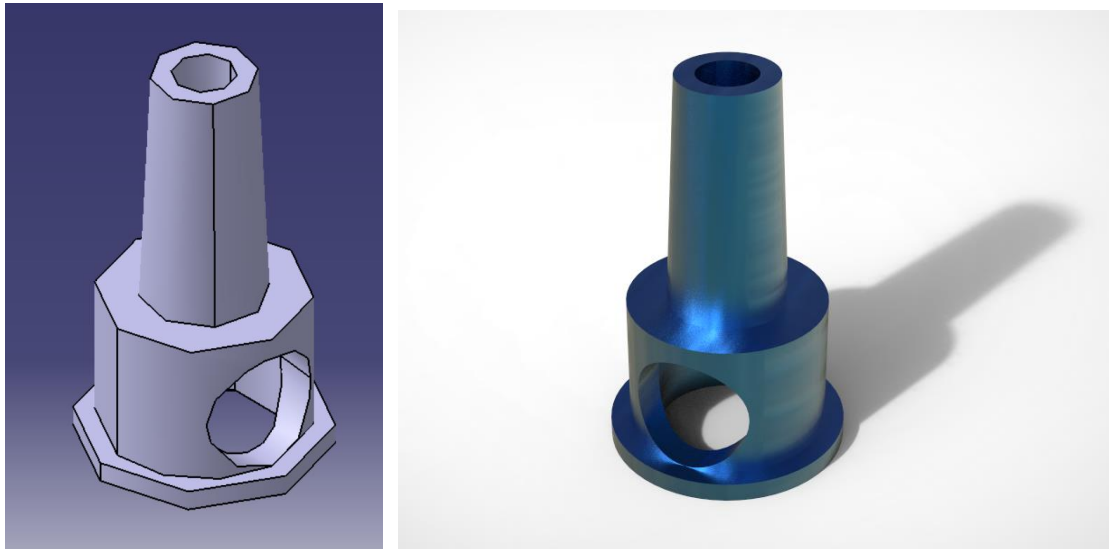


Ilustración 4.41: Valve guide. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Una pareja de estas piezas se coloca por dentro de las cajas superior e inferior de la caja de válvulas, alineando convenientemente los agujeros laterales con las salidas de gases de dichas secciones. Esta pieza actúa como una guía para las válvulas que colocaremos a continuación.

El renderizado se ha realizado en aluminio, aunque por estética se le ha dado una coloración azulada más clara que la de las secciones de la caja.

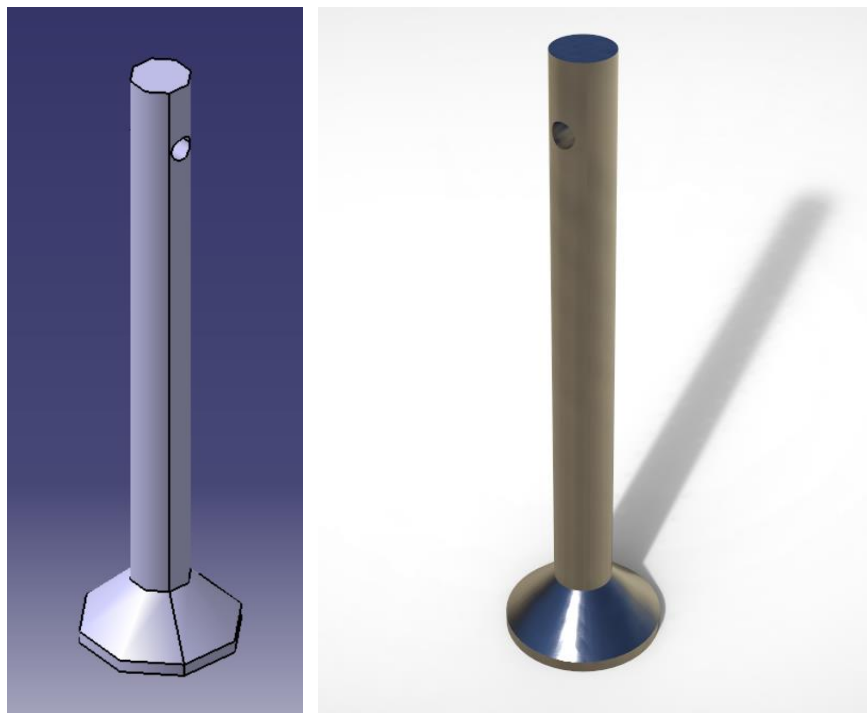


Ilustración 4.42: Valve. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Esta pieza se trata de la válvula que se coloca en las partes inferior y superior de la caja de válvulas. La parte inferior se desplaza dentro de la susodicha caja y bloquea o abre alternativamente las salidas y entradas internas.

Aunque no se ha incluido en esta presentación, en la parte superior de la válvula se coloca un tope, al que se conectará el muelle, junto con un pequeño pasador cilíndrico para bloquearlo.

Para el renderizado, se ha utilizado acero inoxidable.

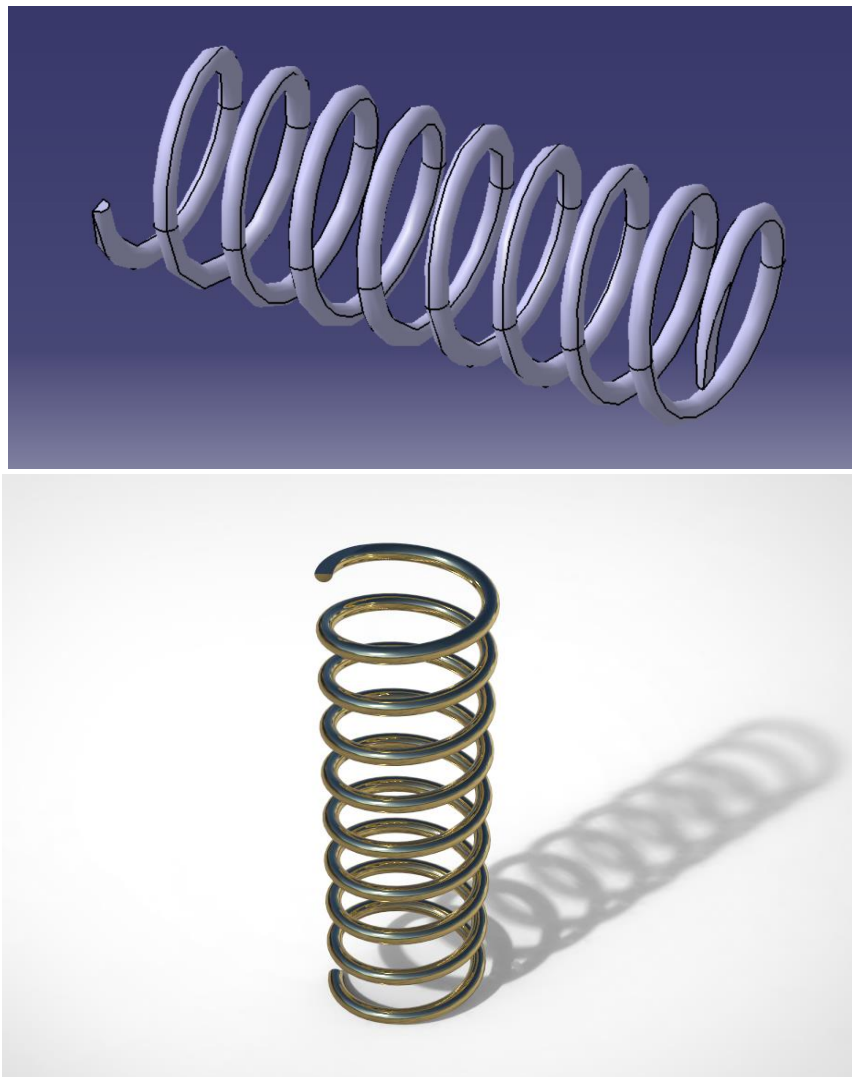


Ilustración 4.43: Muelle. Resultado CATIA (arriba) y tras renderizado (debajo)

El motor Webster utiliza varios muelles, un tipo de pieza muy versátil por sus características elásticas y recuperadoras. Así, introduciendo muelles es sencillo conferir un movimiento cíclico de avance y retroceso a ciertas partes móviles, que se desplazan hasta comprimir al máximo el muelle, para que luego este vuelva a empujar la pieza en

sentido contrario al descomprimirse. Podemos encontrar en la caja de válvulas una pareja de muelles trabajando al unísono, comprimiéndose y expandiéndose alternativamente, acompañando (y provocando) el movimiento cíclico de las válvulas.

Para la realización de estos muelles, CATIA nos ofrece una herramienta muy potente que hasta ahora no se había mencionado: la herramienta *Helix*.

Hasta ahora, las herramientas descritas con las que se ha trabajado estaban dentro del entorno de CATIA de *Part Design*, que nos ofrecía libertad de creación para las diferentes formas que quisiéramos obtener. Sin embargo, al tratarse este de un diseño concreto preconcebido, de cierta complejidad, no encontraremos aquí una herramienta que nos permita diseñar este diseño directamente. Sí la encontraremos en el entorno *Wireframe and Surface Design*, que ofrece herramientas más avanzadas para la creación de superficies o líneas con formas más complejas.



Si seleccionamos dentro de este entorno la opción *Helix*, se nos muestra el siguiente desplegable:

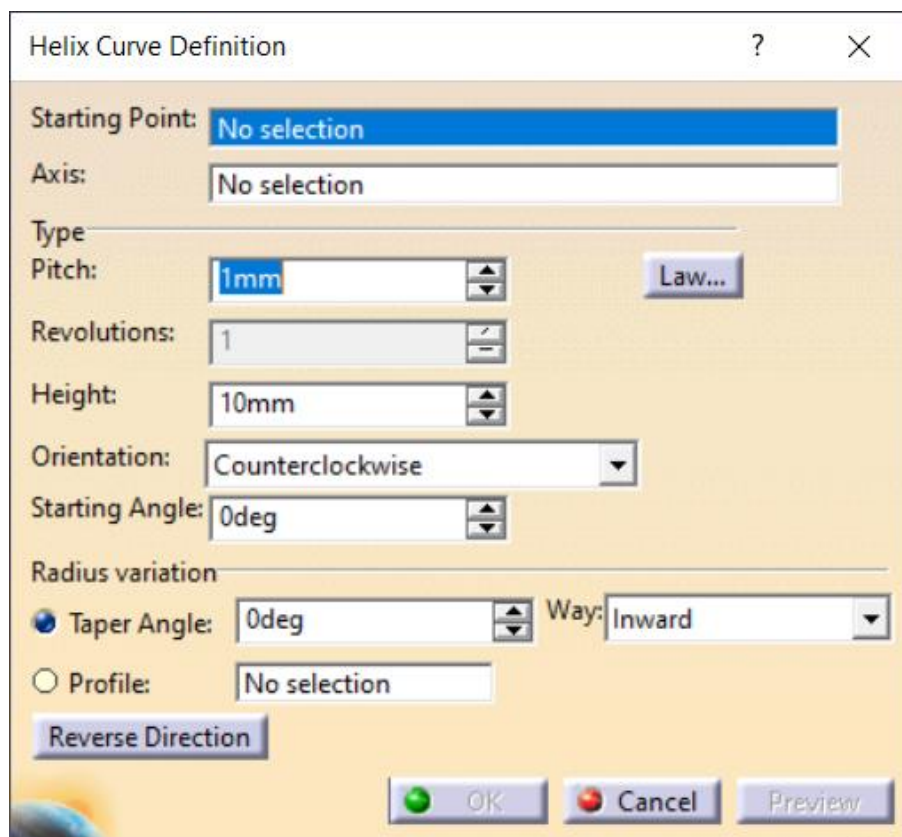


Ilustración 4.44: Especificaciones de la herramienta *Helix*

Introduciendo los parámetros deseados en la tabla anterior, esta nos generará de forma automática una *hélice* en el espacio, es decir, una figura geométrica lineal que se curva de forma cíclica según avanza siguiendo un eje. Según variemos los parámetros que

introduzcamos, conseguiremos hélices más o menos alargadas, con un mayor o menor número de vueltas. Nótese que el radio de apertura de la hélice queda determinado por la colocación del punto de inicio de esta y la distancia de este al eje guía.

Esta línea generada con el comando *Helix* nos servirá de guía para la realización de nuestro muelle. Efectivamente, una vez se ha generado esta curva, solo tenemos que diseñar el *sketch* de un pequeño círculo perpendicular a la línea de la hélice, a la altura del punto de inicio y centrado en este. A continuación, solo tenemos que usar la herramienta *rib* para producir un sólido generado a partir de este círculo, según sigue la guía de la hélice que hemos preparado como generatriz. El grosor del muelle queda determinado por el diámetro de dicho círculo.

Finalmente, volviendo al curso de nuestro trabajo, se le ha aplicado al muelle un renderizado metálico, para simular apariencia de alambre.

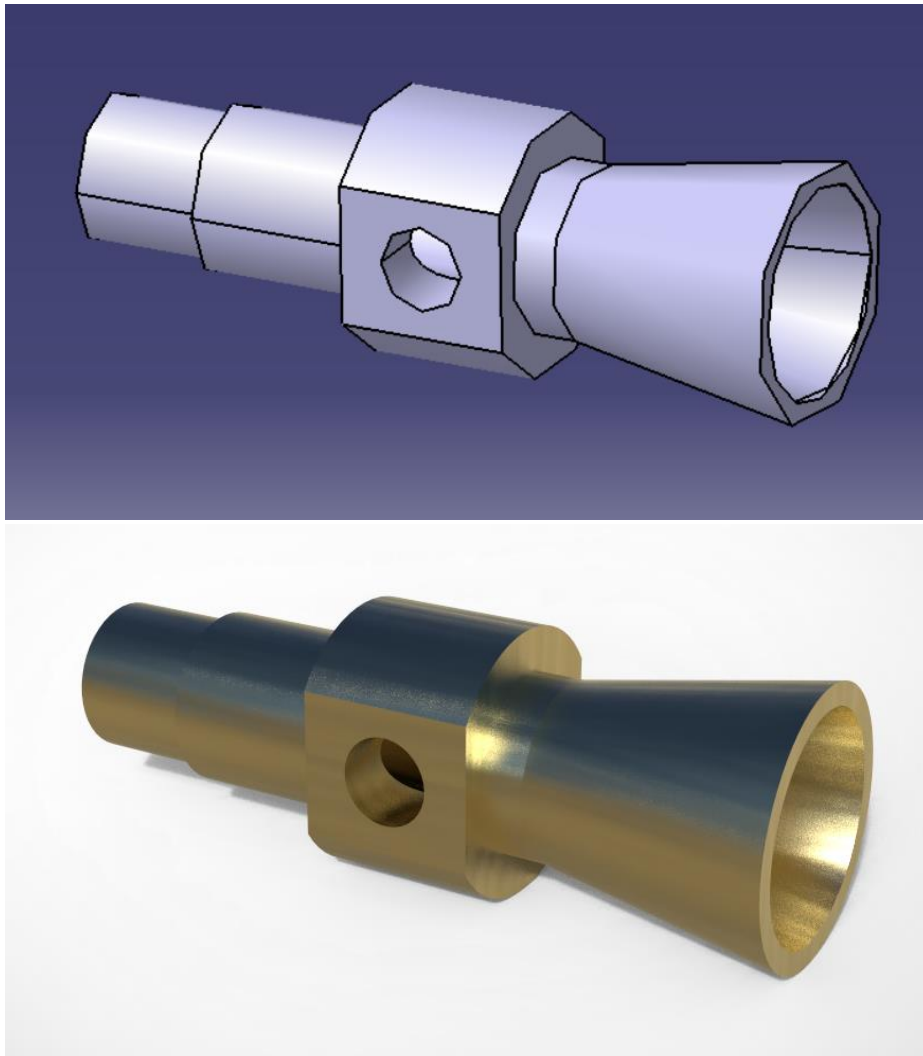


Ilustración 4.45: Venturi. Resultado CATIA (arriba) y tras renderizado (debajo)

De esta pieza es especialmente reseñable que para la elaboración de la boquilla se ha utilizado la herramienta *Multi-sections Solid*. Dado que se contaba con la medida del radio decreciente de esta pieza para varios puntos, esta opción nos permite generar un volumen no trivial con relativa facilidad. Una vez realizado, dado que el resultado obtenido es macizo, se ha vaciado utilizando la herramienta *Shell*, que nos permite establecer un grosor y, partiendo de una de las caras de la pieza, vaciar el contenido del resto de la pieza respetando el grosor establecido. Finalmente se complementó con varios *pockets* para terminar de preparar el elemento según las especificaciones.

Para esta pieza, así como para aquellas directamente conectadas, se ha realizado el renderizado en un latón amarillento, para distinguirlas mejor del conjunto general del motor. En el caso concreto de este elemento que nos ocupa, se le ha dado una impresión más pulida y brillante, al tratarse del segmento central, así como de una pieza atractiva visualmente.

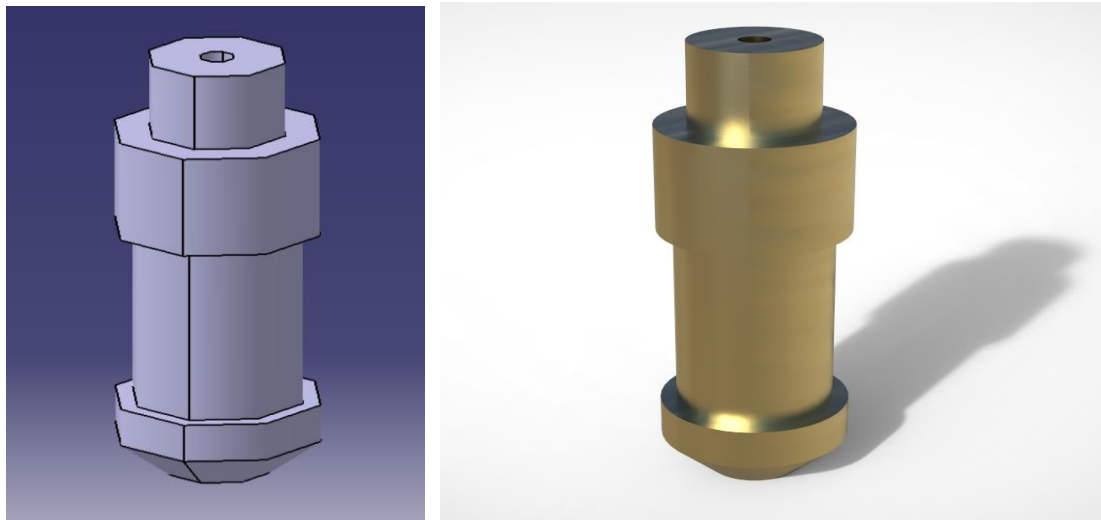


Ilustración 4.46: NV Seat. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

La pieza que cierra la parte inferior de la boquilla; la pieza superior es de características similares, aunque más sencilla (a efectos prácticos, un cilindro con un agujero que sirve de guía para una válvula).

La principal característica que reseñar aquí es el renderizado, del que puede observarse que, si bien está realizado con el mismo material que el aplicado a la pieza anterior, esta tiene algo menos de lustre.

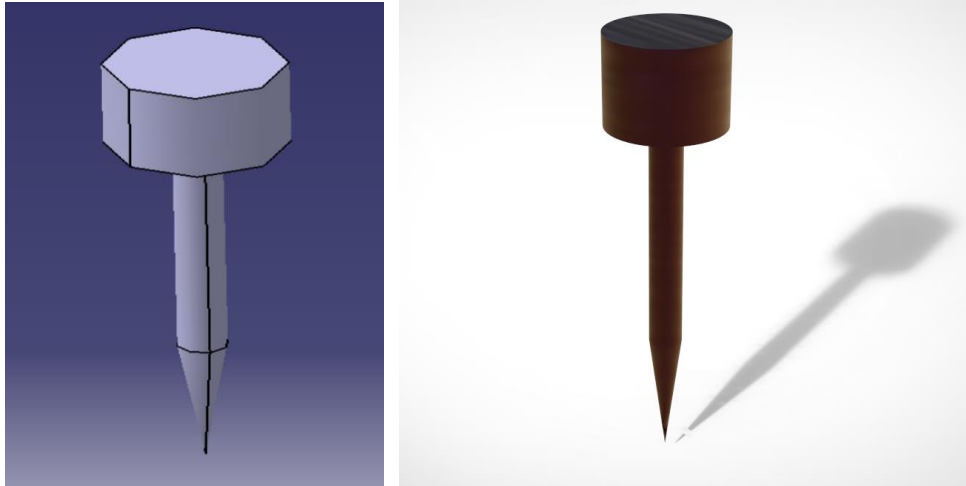


Ilustración 4.47: Needle Valve. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Esta pieza, designada como “válvula de aguja”, está pensada para introducirse por un espacio cilíndrico que le sirva de guía, en un movimiento alternativo vertical. Está acompañada de un muelle para conseguir este efecto. Ya pudimos ver un ejemplo de este mismo mecanismo en la copa proveedora de aceite acoplada al cilindro principal.

La realización de esta pieza es casi trivial, habiendo dibujado en un *sketch* la mitad de esta, para luego revolucionarla con la herramienta *Shaft*, obteniendo directamente la pieza.

Para su renderizado se le ha aplicado un metal más oscuro, para diferenciarla del resto de elementos cercanos.

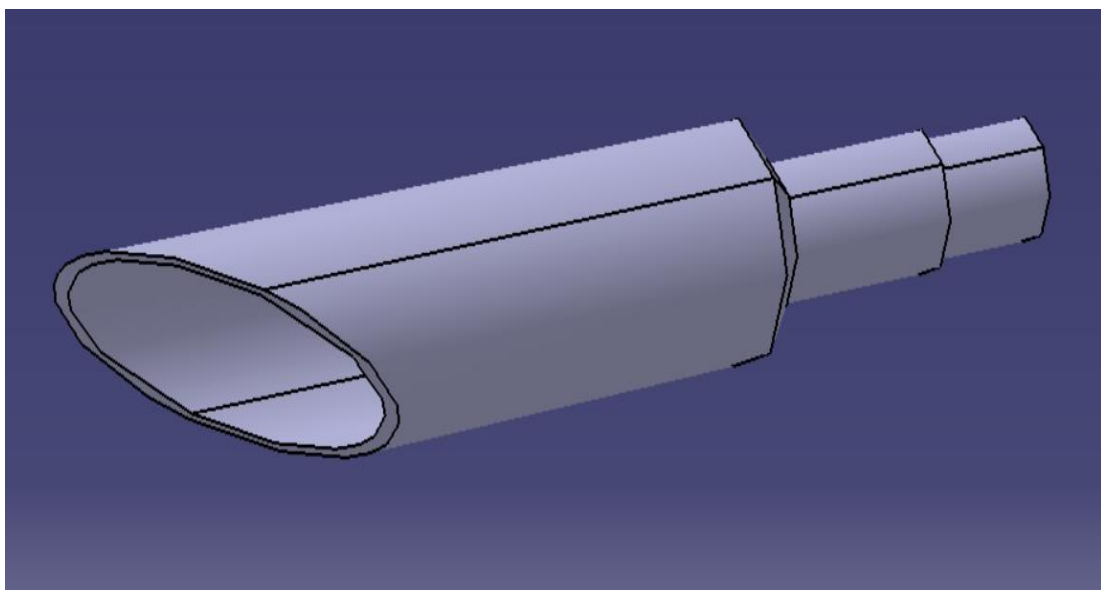


Ilustración 4.48: Exhaust Pipe. Resultado CATIA

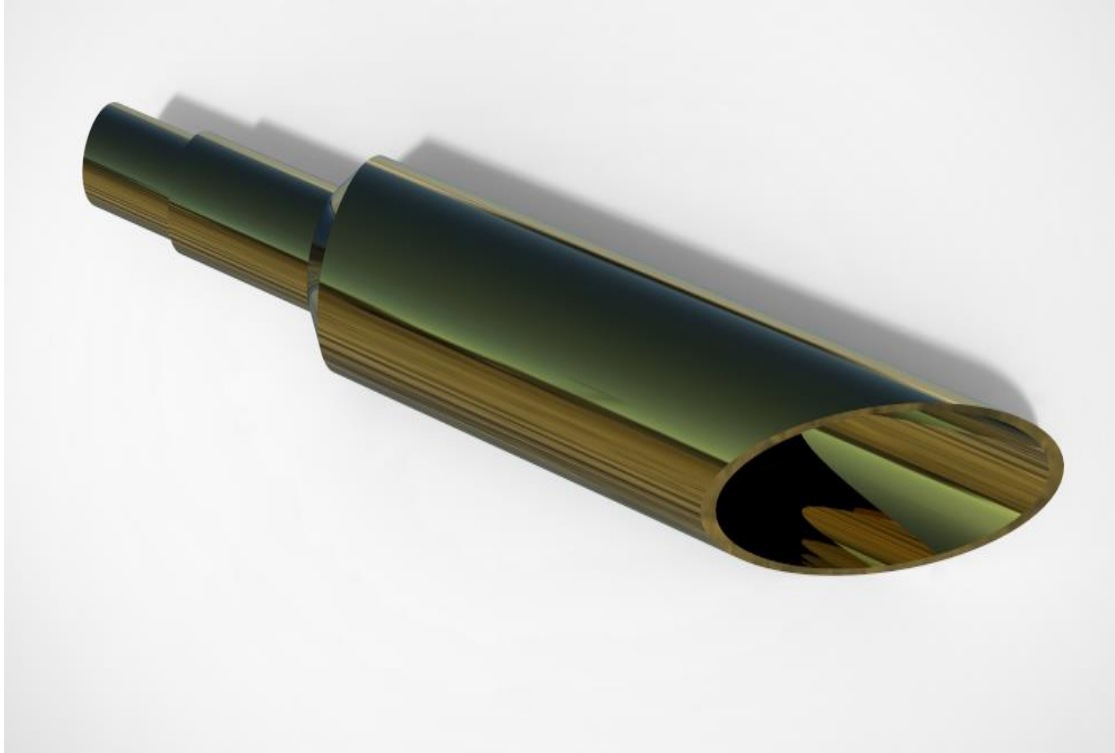


Ilustración 4.49: Exhaust Pipe. Tras renderizado

La última pieza de esta sección es el tubo de escape. En contra de lo que pudiera parecer, se trata de una pieza sencilla, obtenida a partir de varios *pads*, con *pockets* para vaciar la pieza y *chamfers* para los efectos de rebordeo. Lo más interesante resulta del corte final, hecho con un *pocket* con un ángulo determinado, para obtener la salida oblicua del tubo.

Respecto al renderizado, es de reseñar que esta es una de las pocas piezas en las que se ha aplicado un material con una textura totalmente pulida, la cual le confiere a la pieza un efecto reflectante. Combinado esto con el diseño curvo de la pieza, lo cual provoca que obtengamos un espejo cóncavo, y el propio aspecto llamativo de la pieza, nos da como resultado una de las piezas más atractivas visualmente del motor.

4.2.5. - CONJUNTO DE RUEDA Y ENGRANAJES

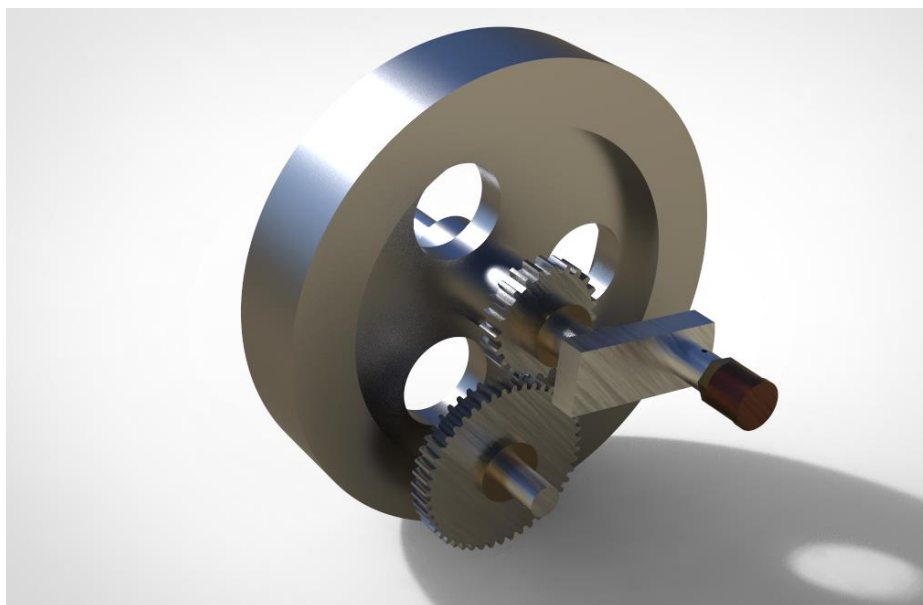
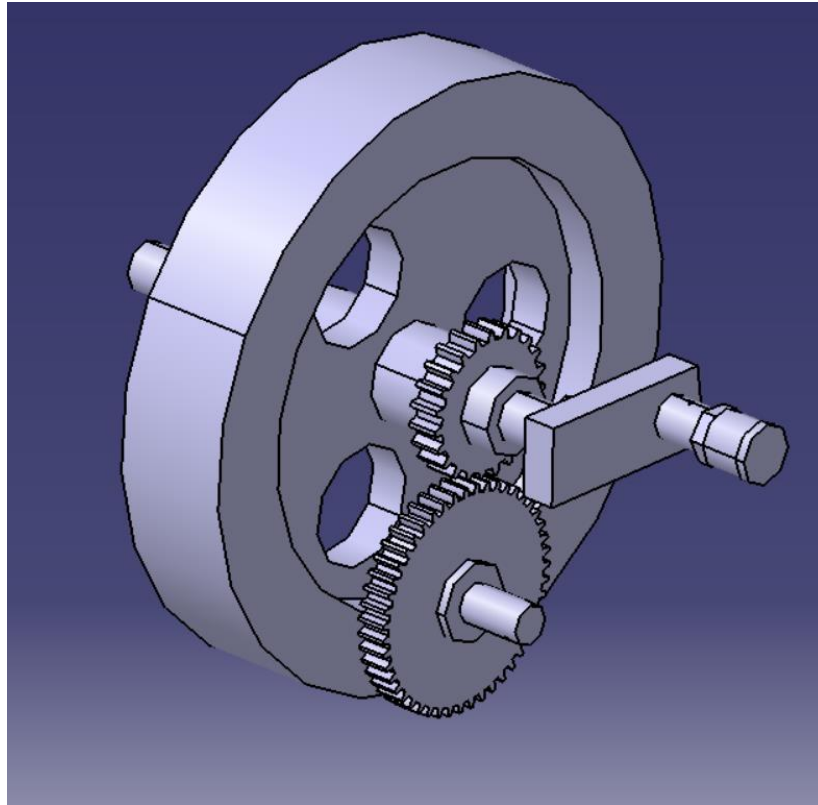


Ilustración 4.50: “Conjunto de ruedas y engranajes”. Resultado CATIA (arriba) y tras renderizado (abajo)

A continuación, se presenta un conjunto de piezas que, si bien no forman un todo unificado, están intrínsecamente relacionadas entre sí. Encontraremos aquí el volante de inercia, adherido al eje del cigüeñal, al cual también están conectados los engranajes transmisores.

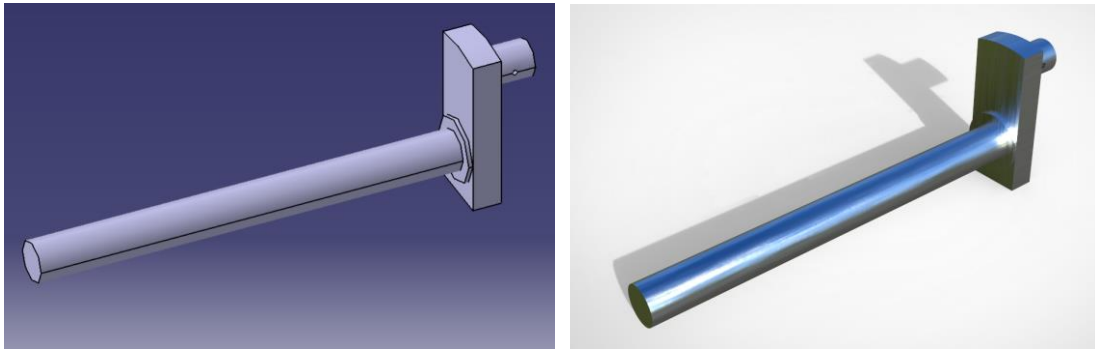


Ilustración 4.51: Crankshaft. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

El cigüeñal del motor, esta pieza actúa como un eje transmisor último del movimiento circular cíclico, del que se obtendrá el trabajo cinético buscado en el motor. Es importante hacer notar como esta pieza cambia su eje central en uno de sus extremos, trasladando y descentrando el movimiento. De esta forma, transforma el movimiento rectilíneo en circular y viceversa.

Siguiendo las indicaciones de los planos, se le ha otorgado un laminado en acero.

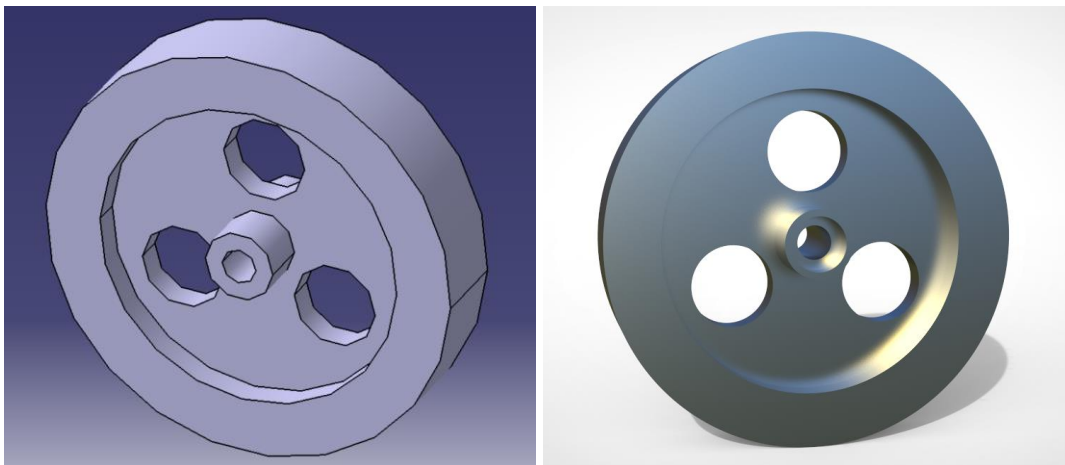
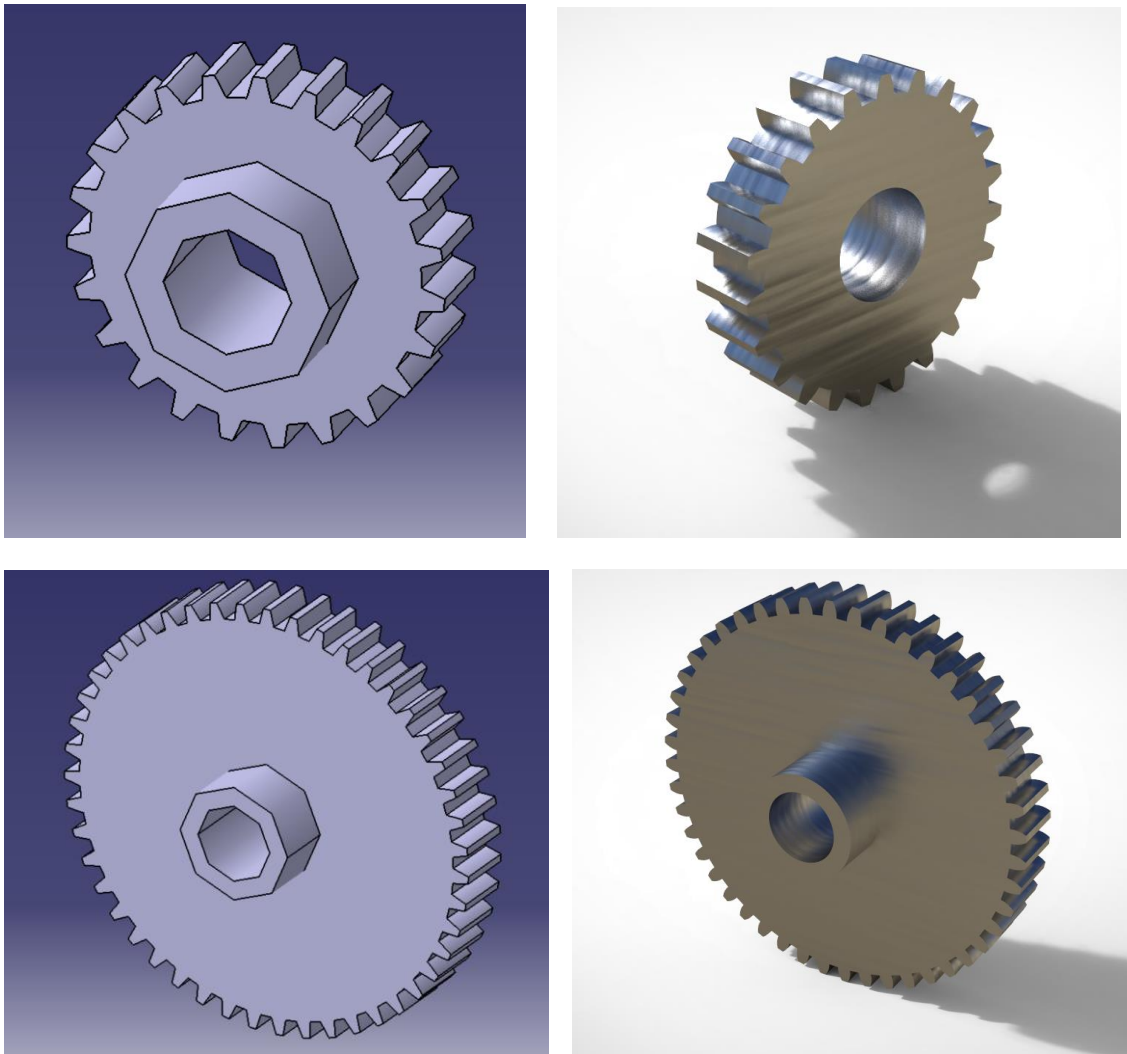


Ilustración 4.52: Flywheel. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Siempre una de las piezas más vistosas y llamativas en este tipo de motores, el volante de inercia, sin embargo, no encierra un diseño excesivamente complejo. En este caso, se ha utilizado exactamente el mismo procedimiento que ya se describió en su momento para el volante de inercia del motor Stirling

Recordemos que la rueda, al igual que otras piezas acopladas a un eje, tendría una pequeña pieza cilíndrica de ajuste, para no friccionar de forma directa con el eje del cigüeñal.

Así mismo, para su renderizado ha vuelto a usarse acero, aunque con un menor nivel de brillo que el cigüeñal.



*Ilustración 4.53: Engranajes; pequeño (arriba), grande (abajo).
Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)*

A la hora de realizar el diseño de los engranajes, se ha realizado un estudio avanzado de sus características. Esto se debe a que este es un diseño crítico, que debe estar realizado con gran precisión, para que los dientes sigan la misma proporción y, por tanto, encajen correctamente entre sí. De no estar correctamente medidos, los dientes de los engranajes podrían bloquearse, ocasionando un fallo crítico del motor.

Se ilustrará a continuación una descripción del estudio realizado, adjuntando las principales características y variables de los engranajes.

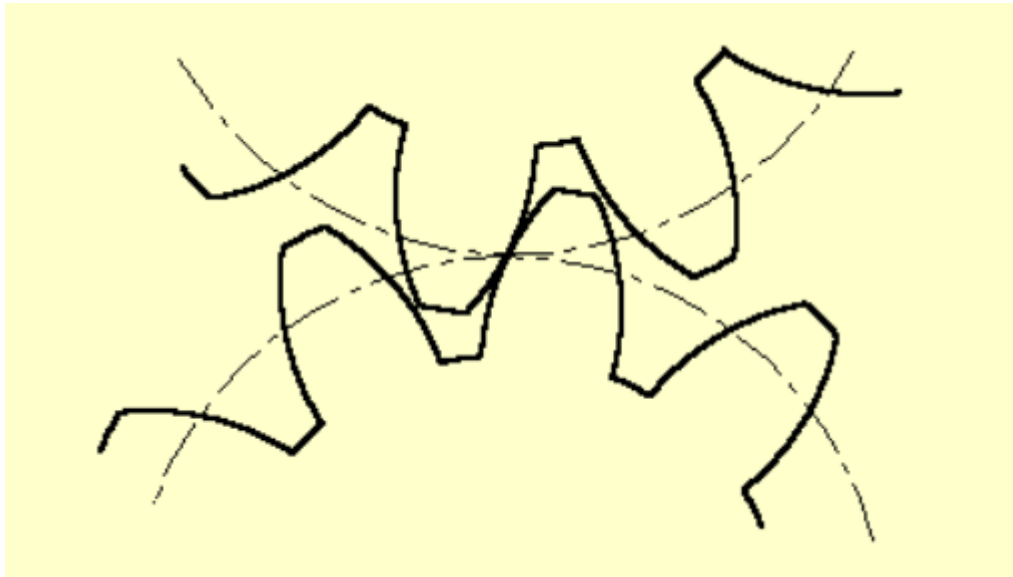


Ilustración 4.54: Conexión entre engranajes. [54]

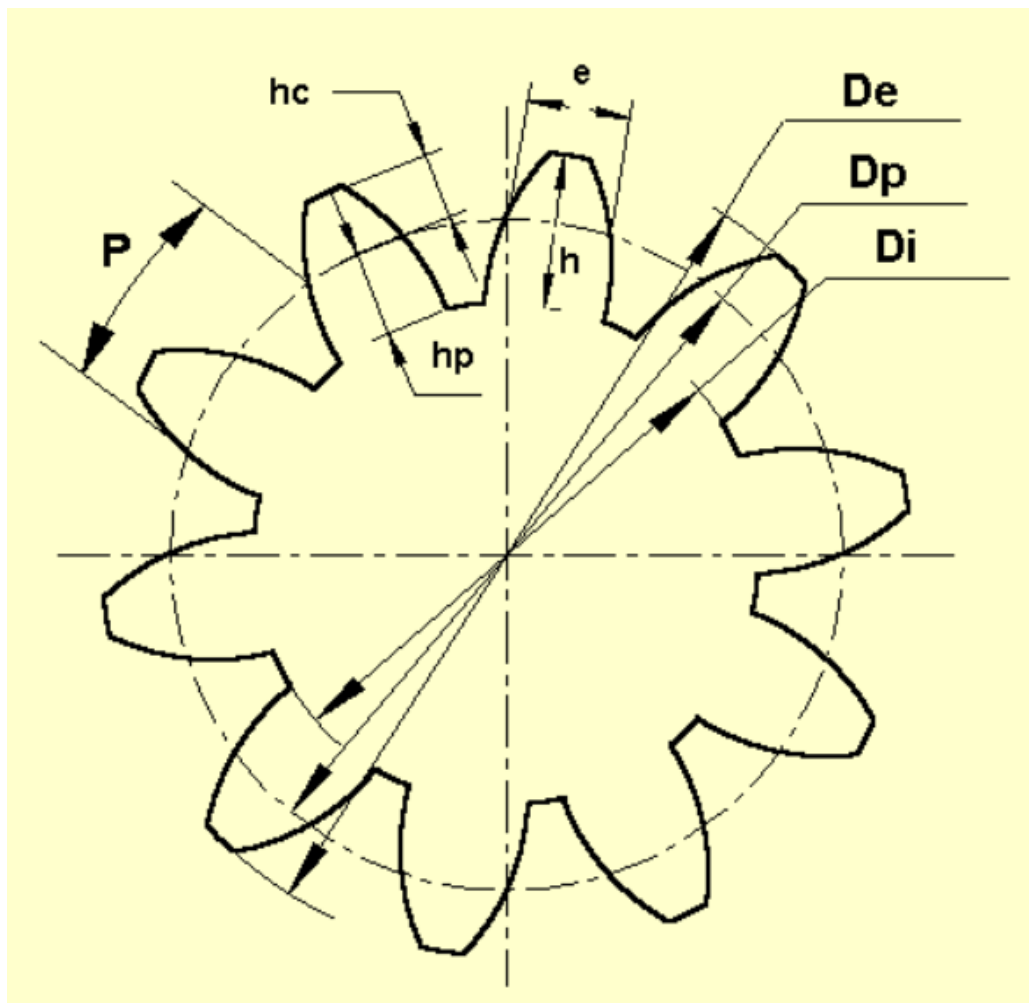


Ilustración 4.55: Desgranado de las características y parámetros del engranaje. [54]

- **Circunferencia primitiva:** Es aquella circunferencia según la cual se realiza la tangencia teórica del engranaje.
- **Diámetro primitivo (Dp):** Es el diámetro correspondiente a la circunferencia primitiva.
- **Diámetro exterior (De):** Es el correspondiente a la circunferencia en la cual está inscrita la rueda dentada.
- **Diámetro interior (Di):** Es el correspondiente a la circunferencia que limita interiormente a los dientes.
- **Paso circular (P):** Es la distancia entre dos puntos homólogos de dos dientes consecutivos, medida sobre la circunferencia primitiva. Para que dos ruedas engranen ambas deben tener el mismo paso circular
- **Módulo (m):** Es el cociente que resulta de dividir el diámetro primitivo entre el número de dientes de la rueda.
- **Altura del diente (h):** medida desde el fondo del diente a la cresta.
- **Altura de la cabeza del diente (hc):** medida desde la circunferencia primitiva a la cresta del diente.
- **Altura del pie del diente (hp):** medida desde el fondo del diente a la circunferencia primitiva.

El número de dientes se designa por “z”, y el espesor del diente, medido sobre la circunferencia primitiva, por “e” [54].

Así pues, teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, debemos asegurarnos de que los engranajes que hayamos diseñado posean el mismo paso circular. Para estos cálculos, puede ayudar la información que el fabricante o diseñador haya añadido sobre los engranajes en los planos; de tratarse tan solo de medidas generales, queda de nuestro parecer establecer los parámetros para que los engranajes sean funcionales.

Así, las fórmulas que se han utilizado para el establecimiento de los parámetros de los motores son [54]:

$$m = \frac{D_p}{z}$$

$$P = \frac{\text{Circunferencia primitiva}}{n^\circ \text{ de dientes}} \rightarrow P = \frac{\pi \times D_p}{z} = \pi \times m$$

Partiendo de estos cálculos iniciales, útiles en función de la información aportada por el fabricante, podemos obtener los engranajes deseados, teniendo en cuenta que estos se diseñan siguiendo una serie de módulos normalizados, según las siguientes indicaciones [54]:

$$h = 2.25 \times m$$

$$h_c = m$$

$$h_p = 1.25 \times m$$

$$e = 0.5 \times P$$

$$D_p = m \times z$$

$$D_s = D_p + 2h = D_p + 2m$$

$$D_i = D_p - 2h_p = D_p - 2.5m$$

Una vez realizados los cálculos pertinentes, el diseño de los engranajes se revela sencillo, más allá de la correcta introducción de los parámetros al realizar el *sketch*; aparte de esa pertinencia, la construcción puede realizarse con un *pad*. Sí es de destacar, no obstante, que en nuestro caso se decidió diseñar un único diente, para a continuación replicarlo alrededor de la rueda con un *Circular Pattern*, asegurándonos de estar cumpliendo con las distancias entre dientes calculadas.

Finalmente, a pesar de que en las instrucciones de los planos está especificado el latón como material para los engranajes, se ha decidido hacerles el renderizado con una base de acero, para imprimirles una apariencia más resistente, así como una mejor estética.

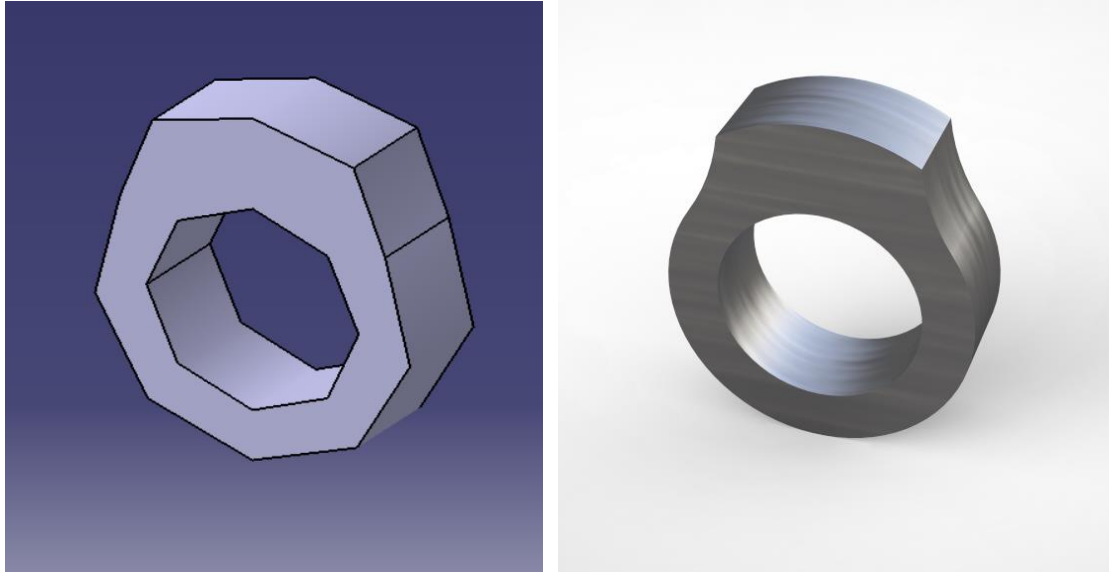


Ilustración 4.56: Exhaust Cam. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Esta leva es la última pieza del conjunto de la rueda y los engranajes. Si bien la pieza en sí no encierra ninguna relevancia extraordinaria en su diseño, habiéndose realizado en un único *pad*, queremos reseñar un caso de tangencia entre circunferencias, una de las opciones a establecer dentro del entorno *Sketch*, y que puede observarse con facilidad en el lateral de la pieza en la imagen del renderizado.

4.2.6. - PIEZAS FINALES

En este apartado comentaremos una pareja de piezas restantes del motor, que no hemos considerado que formaran parte integral de ninguno de los conjuntos o secciones descritas en este apartado. Estas dos piezas actúan en conjunto, e interaccionan con la última leva mostrada en el apartado anterior, y con la válvula de aguja inferior de la caja de válvulas.

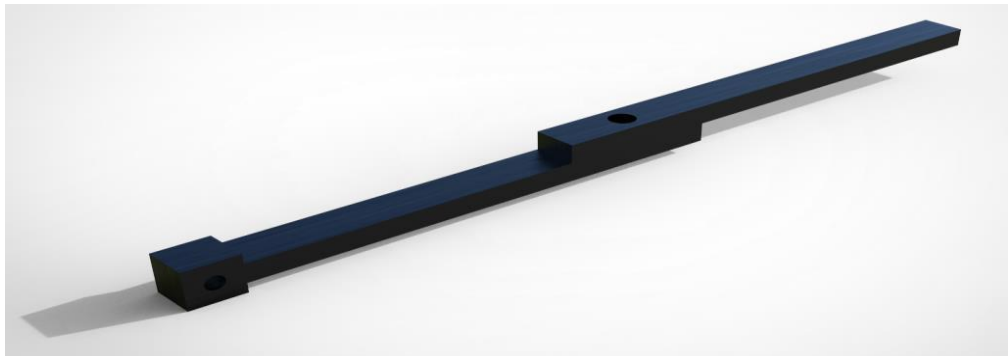
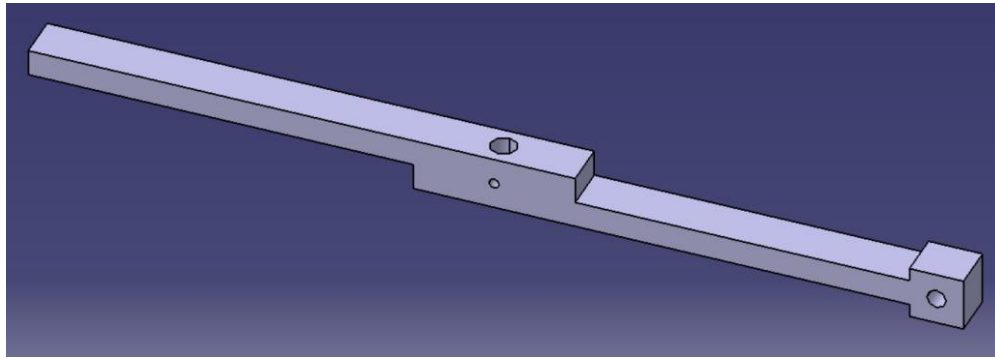


Ilustración 4.57: Rocker arm. Resultado CATIA (arriba) y tras renderizado (debajo)

Este balancín, que gira sobre un eje conectado a la placa de la estructura base posterior, es una pieza sencilla en su diseño, que puede alzarse simplemente con un único *pad*, para luego aplicarle los agujeros correspondientes.

En su extremo se colocará una pieza pequeña, como algún tipo de tornillo, que empujará cíclicamente la válvula de aguja inferior anteriormente mencionada.

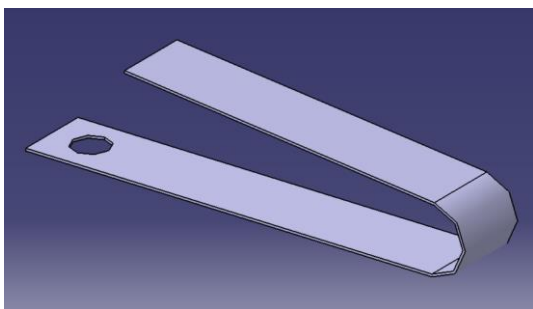


Ilustración 4.58: Rocker arm spring. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

Esta pieza, que complementa al balancín, se atornilla directamente a la placa base. Está pensada para poseer cierta elasticidad, de modo que cuando el balancín descienda y la comprima, esta tiende a recuperar su forma original, empujando de vuelta al balancín, acompañando así al movimiento cíclico que caracteriza al motor.

Para su elaboración, se ha utilizado la herramienta *Rib*, dibujando una línea guía a la que luego se ha hecho seguir un rectángulo transversal de espesor reducido.

Siguiendo las indicaciones de los planos, se ha renderizado la pieza con acero, dándole un cierto brillo. Este material es adecuado para el desempeño de la pieza, puesto que tiene buenas características recuperadoras. En todo caso, es de esperar que la presión ocasionada por el balancín no sea de suficiente magnitud como para imprimir una deformación permanente y palpable a esta pieza.

4.2.7. - MOTOR WEBSTER

En este último apartado se mostrarán los resultados finales del conjunto completo de las piezas del motor Webster, debidamente ensambladas en CATIA, así como su posterior tratamiento en Keyshot para añadirles el renderizado.

Debe denotarse que el motor presenta algunas aperturas y elementos abiertos al exterior. Estas están pensadas para conectar elementos externos, como los contenedores de combustible o mecanismos eléctricos que aprovechen la energía cinética producida. En cualquier caso, estos elementos son, como se ha dicho, externos al motor y no forman parte de los planos ni del diseño intrínseco de este.

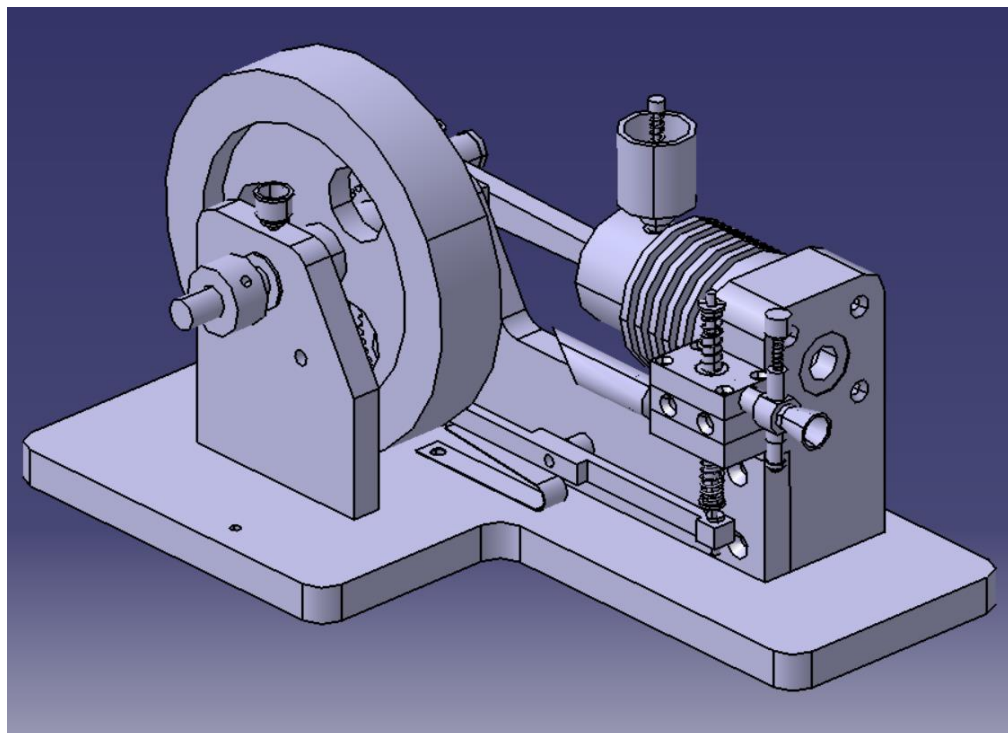


Ilustración 4.59: Motor Webster; vista general. Resultado CATIA

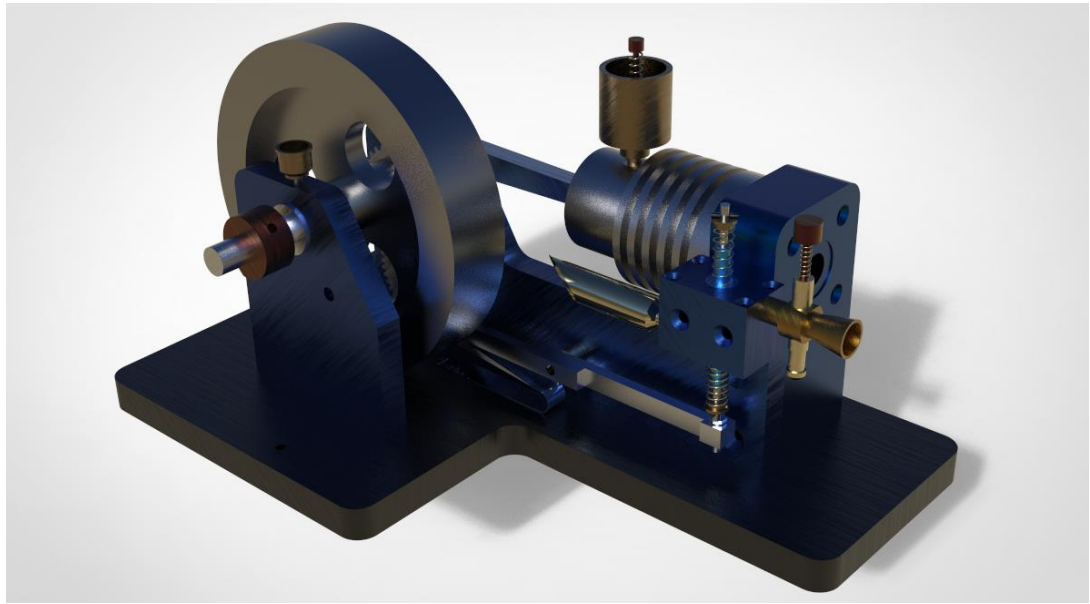


Ilustración 4.60: Motor Webster; vista general. Tras renderizado

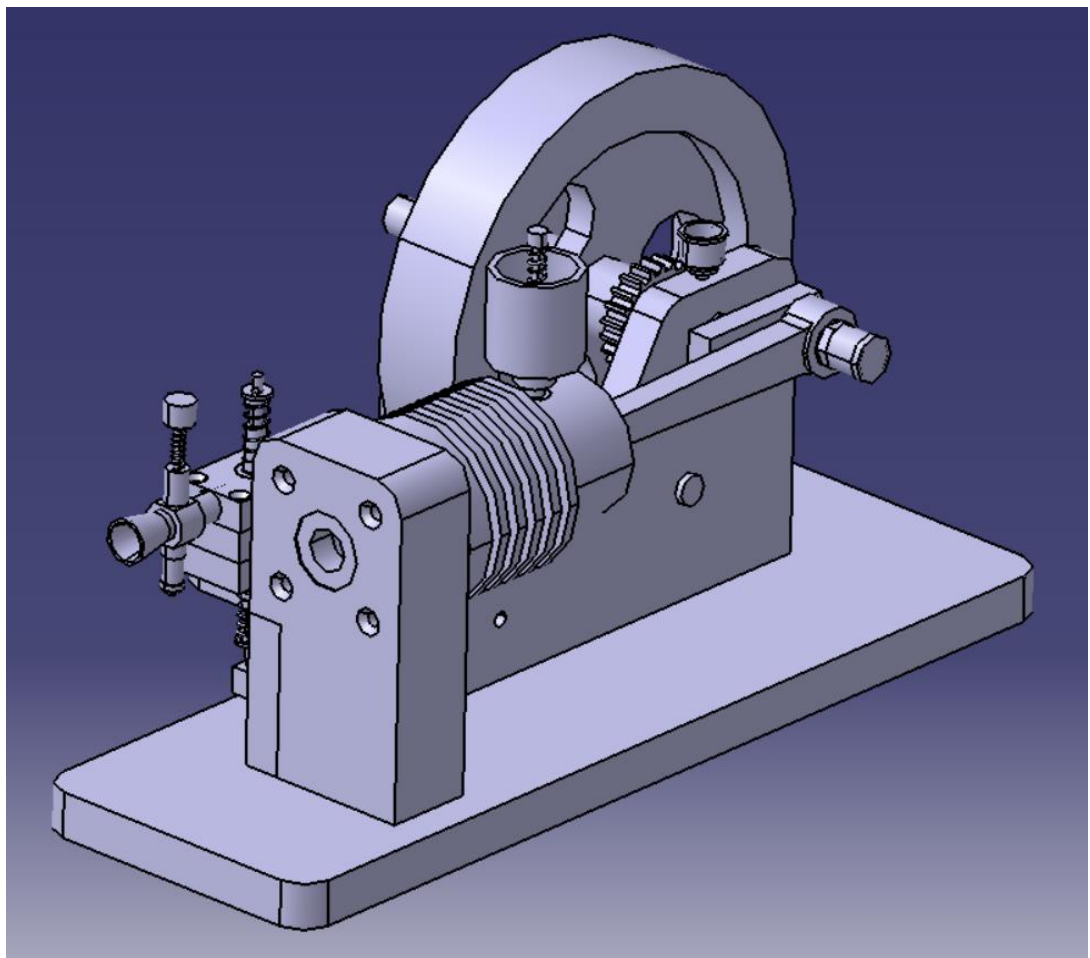


Ilustración 4.61: Motor Webster; vista posterior. Resultado CATIA

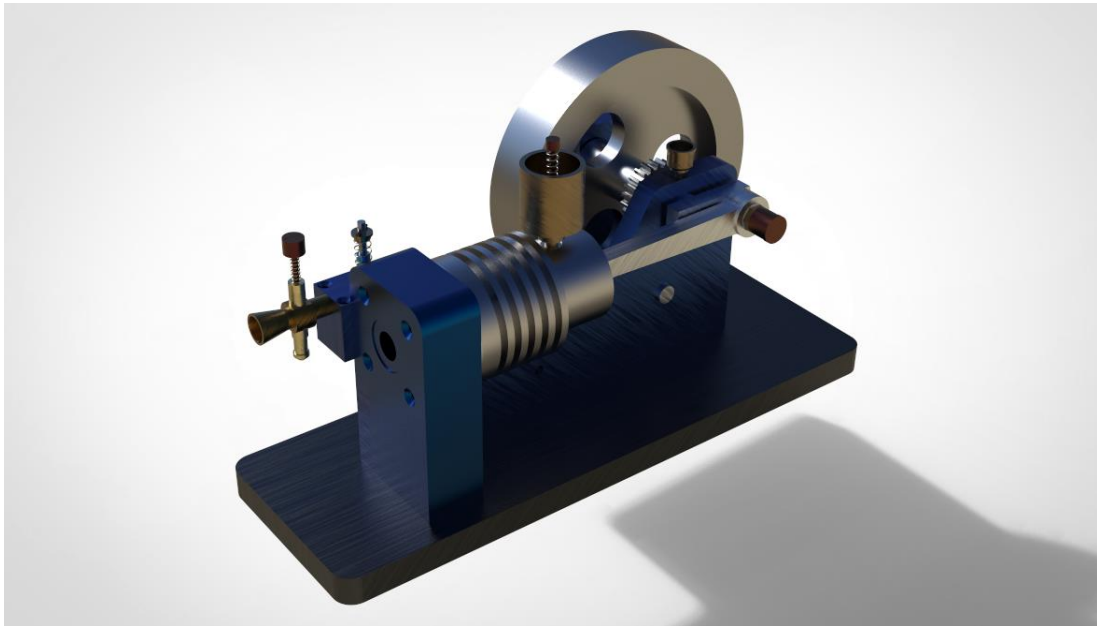


Ilustración 4.62: Motor Webster; vista posterior. Tras renderizado

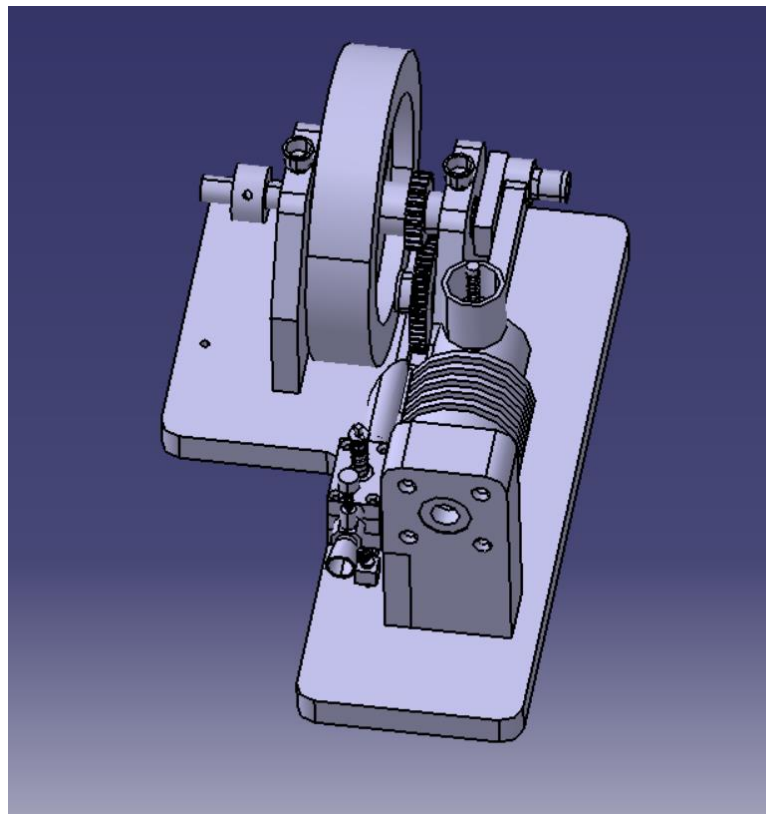


Ilustración 4.63: Motor Webster; vista lateral. Resultado CATIA

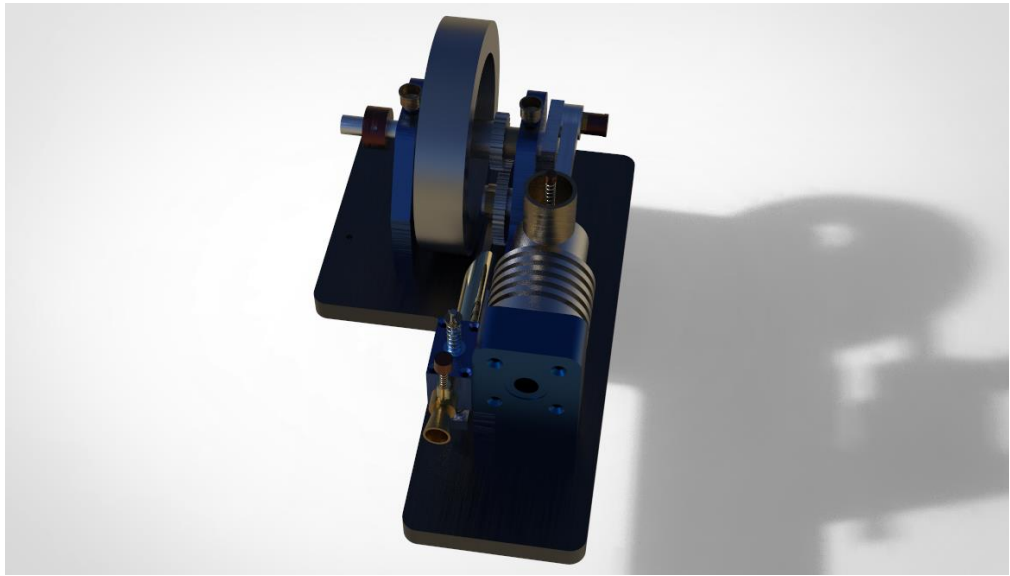


Ilustración 4.64: Motor Webster; vista lateral. Tras renderizado

5. – FUNCIONAMIENTO Y CICLOS

En el presente apartado se procederá a realizar un análisis técnico de ambos motores, en el que se explicará sucintamente las bases y principios de su funcionamiento. Esto incluirá una descripción de las propias maniobras que realiza el motor, explicando el mecanismo y movimiento de sus piezas, y a continuación, se hablará sobre los ciclos termodinámicos por los que se rigen ambos motores, y que nos permitirán hacernos una idea de su capacidad de producción de energía y de su eficiencia.

Si bien este Trabajo está orientado como una labor de diseño, siendo el modelado con CATIA, mostrado en el apartado anterior, el principal objetivo y motivación del presente texto, se ha considerado que en cualquier manuscrito que verse sobre motores es imprescindible realizar esta sección, para ofrecer una información que nos permita distinguir de las propiedades y bondades de estos motores que estamos analizando, y añadir así una capa más de utilidad a este Trabajo.

5.1. - Motor Stirling

5.1.1. - DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO

El motor Stirling se trata de un motor térmico. Su funcionamiento básico se basa en la expansión y contracción de un gas que se mantiene dentro del conjunto de maquinaria del motor, en un proceso cíclico. La especificación de que el gas se mantiene permanentemente dentro del motor es de suprema importancia, pues permite definir el motor como uno de ciclo cerrado [15].

Los motores Stirling, como se ha comentado, se basa en la contracción y expansión de un gas dentro de un circuito cerrado; dicho gas tendrá dos estados o consideraciones: gas frío y gas caliente. Si bien existen varios tipos de motores Stirling, con varias configuraciones, todos trabajan aplicando ciclos de contracción y expansión a los gases en las zonas fría y caliente de forma alternativa, aprovechando así la influencia intrínseca que tiene la temperatura en la presión que ejerce el gas, y que trabaja como impulsor del movimiento de las piezas del motor.

Como se ha mencionado, existen varios tipos de motores Stirling, y varias configuraciones y regímenes de trabajo. En el caso particular del motor que se ha diseñado para el presente trabajo, tenemos un *motor Stirling de tipo gamma*. No obstante, para la explicación del funcionamiento de este, describiremos en primer lugar como trabaja un motor de tipo *beta*, pues el *gamma* no es sino un caso particular de este último [15].

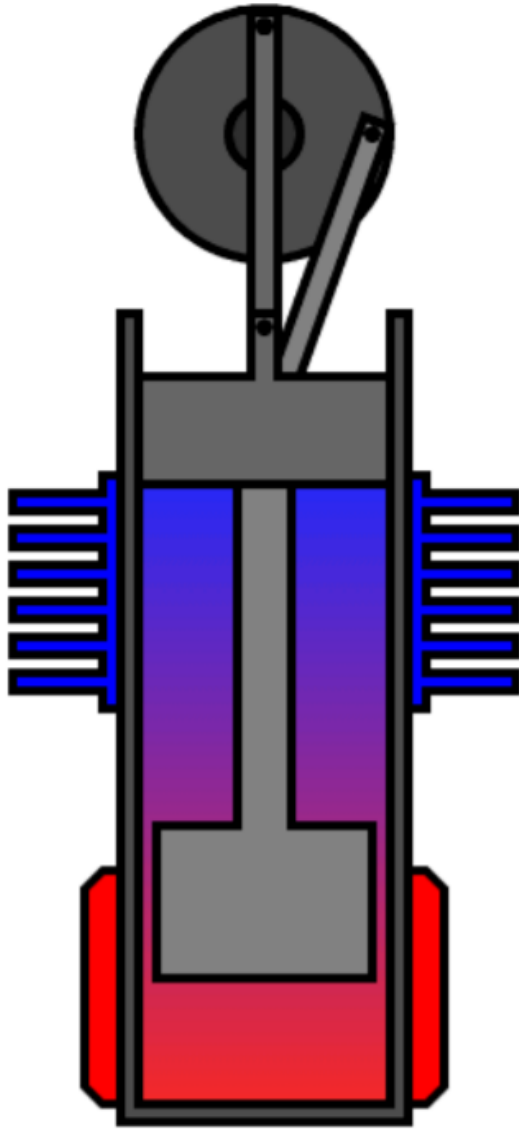


Ilustración 5.1: Motor Stirling tipo beta [56]

Así, ejemplificando y buscando la máxima simplicidad, se ilustrará un motor Stirling de tipo *beta* de la siguiente forma:

Un motor Stirling de tipo *beta*, a grandes rasgos, presenta la configuración mostrada en la imagen anterior: posee un único pistón, que comparte cilindro de actuación con un desplazador. En la parte inferior del cilindro encontramos una fuente de calor, que aumentará la temperatura del gas que se encuentre en esa zona, mientras que en la parte superior actuará un enfriador. Debe denotarse que este “enfriador” puede ser algún tipo de máquina térmica que imprima este efecto de enfriamiento, o simplemente confiar en la propiedad disipativa de las propias paredes del cilindro y del material, en ausencia de una fuente de calor activa. Este es precisamente el caso en el motor que hemos diseñado para este Trabajo. También debe denotarse que las partes “frías” y “calientes” del motor están conectadas, ya que como puede observarse, el desplazador no está en contacto hermético con las paredes del cilindro, dejando pasar por tanto el fluido a su alrededor.

Así pues, en lo que respecta al funcionamiento del propio motor; comenzaremos considerando que el desplazador está alzado (lo que maximiza la superficie de la parte “calentadora” del cilindro en contacto con el gas interior) mientras que el pistón está bajado, y, por tanto, comprimiendo el gas entre el propio pistón y el desplazador alzado.

Partiendo de esta situación inicial, tenemos, en la parte inferior del cilindro, una cantidad amplia de gas que está siendo calentado. Esto aumenta su energía y la presión que ejerce; así, el gas caliente se filtra alrededor del desplazador, y ejerce presión sobre el pistón, empujándolo hacia arriba.

Este impulso del pistón provoca a su vez el giro de la rueda, lo cual implica que el desplazador descienda. Ahora hemos ampliado al máximo la zona de enfriamiento, mientras se comprime la zona de gas caliente.

La inercia de la rueda provoca a continuación que el pistón vuelva a descender. El gas de la zona de enfriamiento comienza a comprimirse, y, por lo tanto, a filtrarse de vuelta a la zona de gas caliente. Una puntualización importante es que el proceso aquí descrito cuesta menos trabajo y energía que los primeros compases descritos del movimiento del motor, puesto que el gas de la zona de enfriamiento había empezado, precisamente, a enfriarse. Esto reduce su energía intrínseca, y, por lo tanto, *hace más fácil que sea comprimido*. Encontramos aquí, por lo tanto, la ganancia de energía del motor Stirling.

Ahora que el gas está filtrándose de vuelta presionado a la zona caliente, este hecho, acompañado del movimiento cíclico de la rueda, hace que el desplazador vuelva a alzarse, volviendo así a la situación inicial del desplazador alzado, con la zona caliente maximizada, y cerrando, por tanto, el ciclo.

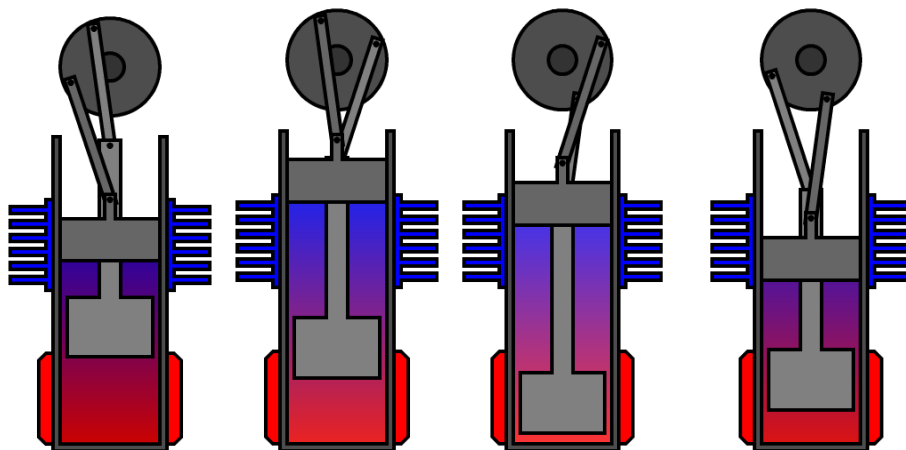


Ilustración 5.2: Ciclo de funcionamiento del motor Stirling de tipo beta [56]

Una vez se ha explicado el funcionamiento de este tipo de motor Stirling (que, a grandes rasgos, recoge los puntos esenciales de cualquier otro tipo de estos motores), enunciar el motor tipo *gamma* es sencillo: funciona exactamente igual que el presentado de tipo *beta*, con la diferencia de que el pistón y el desplazador no comparten cilindro. En cambio, cada elemento móvil funciona en un cilindro diferente, aunque conectados, habitualmente en esquema perpendicular [15]. Esta decisión amplía la zona de compresión, y, por lo tanto, reduce el ratio de compresión que alcanza el gas en su interior, lo cual implica una disminución de la eficiencia general del motor. No obstante, se ha encontrado que diseñar el motor con esta configuración hace más fácil la construcción y disminuye la complejidad de los diseños. Esto ha llevado a que los motores *gamma* sean mucho más populares y comunes que los de tipo *beta*.

Así pues, fijándonos en nuestro propio diseño, y después de haber descrito el funcionamiento general de estos motores, resulta sencillo distinguir el movimiento de sus elementos que siguen las maniobras mencionadas:

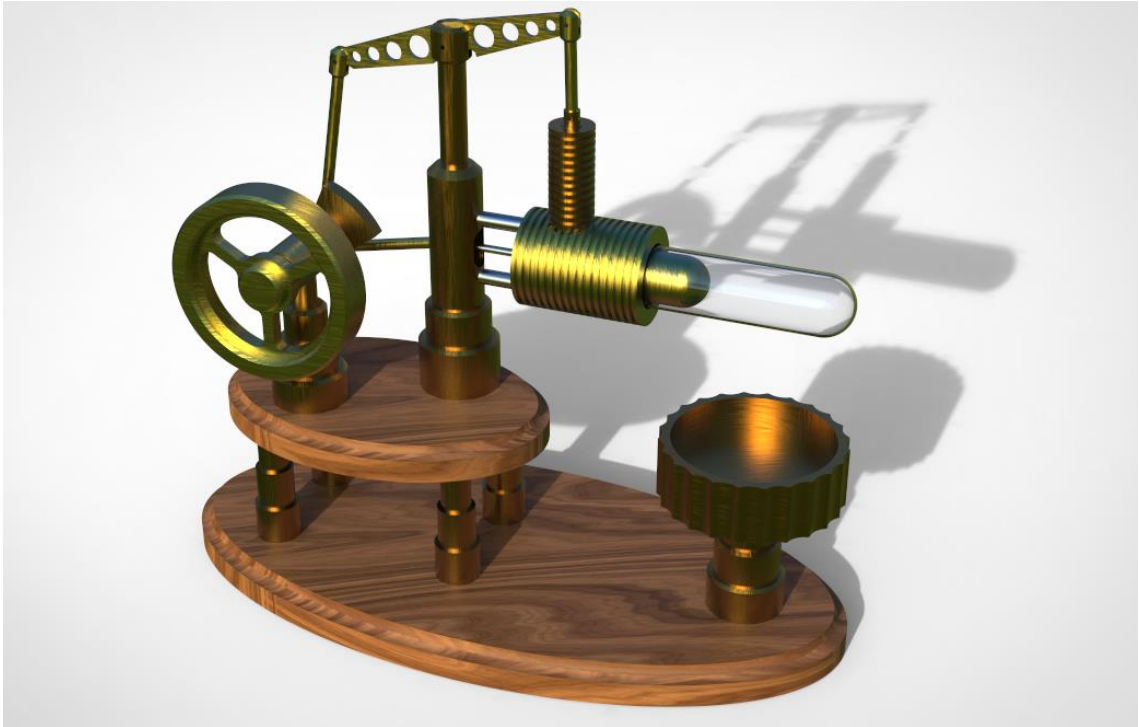


Ilustración 5.3: Motor Stirling estudiado en el presente Trabajo

Como sabemos, en el soporte colocado en la base inferior debemos incorporar una fuente de calor: un hornillo, vela, o algo similar. Una vez esta empiece a tener efecto, calentará el aire contenido dentro de la probeta de cristal colocada directamente encima.

Observando la imagen, es fácil identificar los elementos del proceso general: El desplazador, que es la pieza que avanza dentro de la probeta, el propio cilindro principal, que actuará como enfriador, disipando calor por sus paredes, y el cilindro secundario (al tratarse de un motor tipo *gamma*) dentro del cual trabajará el pistón, en disposición perpendicular respecto al cilindro principal. Tanto el pistón como el desplazador están conectados al mismo sistema giratorio, en el cual encontramos el volante de inercia, que se convertirá en impulsor del movimiento una vez que este haya empezado a girar.

Así, una vez que el aire de la probeta se haya calentado, este aumentará su energía y la presión que ejerce; se filtrará por los laterales del desplazador (que como podemos observar, no está en contacto con la propia probeta de cristal, y, por lo tanto, permite este desplazamiento). En este momento, ese aire subirá por el cilindro secundario y empujará hacia arriba el pistón.

Podemos ver como este movimiento se transmitirá por el sistema de ejes conectado al balancín, hasta hacer girar la leva y el volante de inercia. Llegado ese momento, el desplazador se habrá movido hasta el final de la probeta, y habiéndose maximizado la superficie de enfriamiento, el aire interno del cilindro habrá reducido su temperatura, reduciendo su resistencia a la compresión. Así, en un movimiento acompasado, el movimiento de la rueda acabará por hacer volver al pistón, que comprimirá con mayor facilidad el aire dentro del cilindro, el cual se filtrará por los bordes del desplazador. En esta etapa final, acompañada por el movimiento ya iniciado de la rueda, el desplazador volverá a retroceder, maximizando el volumen de aire que contiene la zona caliente; y así, el ciclo vuelve a comenzar.

Es usual, a la hora de ver experimentos realizados con este motor a baja escala, que una vez que se ha calentado ligeramente el aire inicial de la probeta, se le otorgue un impulso manual, que luego continúa por inercia, apoyado por el aire ya calentado. Esto suele hacerse ya que es necesario que el aire acumule bastante energía para poder desplazarse y mover las piezas por sí mismo. Sin embargo, si el motor está correctamente construido y no hay fricción entre sus piezas, es de esperar que el movimiento se inicie tarde o temprano.

5.1.2. - CICLO STIRLING

Describiremos a continuación el ciclo termodinámico por el que se rige el funcionamiento del motor Stirling. Como se comentaba al inicio del presente apartado, si bien esta sección dista de los objetivos básicos buscados en un Trabajo con una orientación al diseño, puesto que este texto versa sobre motores térmicos, es indispensable desgranar los sistemas de energía que los respaldan. Solo entonces podremos hacernos una idea completa de sus posibilidades.

Así pues, el ciclo Stirling, nombrado de forma directa por el motor que nos ocupa, puesto que ambos, motor y ciclo que sigue, fueron ideados a la par por Robert Stirling [1], se trata de un ciclo termodinámico considerado “ideal” [57]. El ciclo Stirling, seguido por el motor del mismo nombre, destaca por su gran aproximación al ciclo ideal de Carnot, que está considerado el marco de referencia para la máxima eficiencia alcanzable por un motor.

Otros ciclos ideales, como el Otto o el Diesel, no se consideran totalmente reversibles, puesto que sufren pérdidas de calor durante los procesos isocóricos o isóbaros que incluyen. La presencia de un factor de irreversibilidad implica siempre un estadio de eficiencia inferior al expuesto por el ciclo de Carnot. Sin embargo, es aquí donde brilla un motor Stirling; puesto que su proceso sí alcanza la condición de irreversible [58].

De hecho, el ciclo Stirling aparece como una derivación del propio ciclo de Carnot, el cual sustituya los procesos isentrópicos (a entropía constante) de este último por dos

procesos isocóricos (procesos en los que el volumen del fluido se mantiene constante) [58].

La calificación de reversibilidad es fundamental, puesto que implica que este motor puede obtener un rendimiento máximo de su funcionamiento, permitiéndole funcionar como una máquina térmica eficaz a máxima eficiencia. Así mismo, destaca por su versatilidad, puesto que, dado que en los procesos implicados en este ciclo existen puntos de adición o sustracción de calor (los procesos de calentamiento o enfriamiento), esto significa que el motor no solo permite obtener energía cinética de su movimiento, sino que también puede actuar como un calentador o enfriador activo (de ahí la consideración de máquina térmica anteriormente mencionada) [58].

Refiriéndonos al ciclo en sí, este presenta, como es habitual en otros ciclos de calor, cuatro procesos consecutivos: compresión, adición de calor, expansión y sustracción de calor. No obstante, debemos denotar que, aunque en las representaciones gráficas aparezcan como procesos independientes, consecutivos, unos a continuación de otros, en la realidad estos se solapan hasta cierto punto. Este hecho puede observarse con facilidad en la descripción que hemos realizado previamente sobre el movimiento y el funcionamiento del motor: recalamos que varias de sus operaciones, como el avance y retroceso del pistón y el desplazador (y las consiguientes expansiones y compresiones) y la mayor actividad de las zonas caliente y fría, si bien ocurrían siguiendo un orden, en algunos momentos se daba simultaneidad [57].

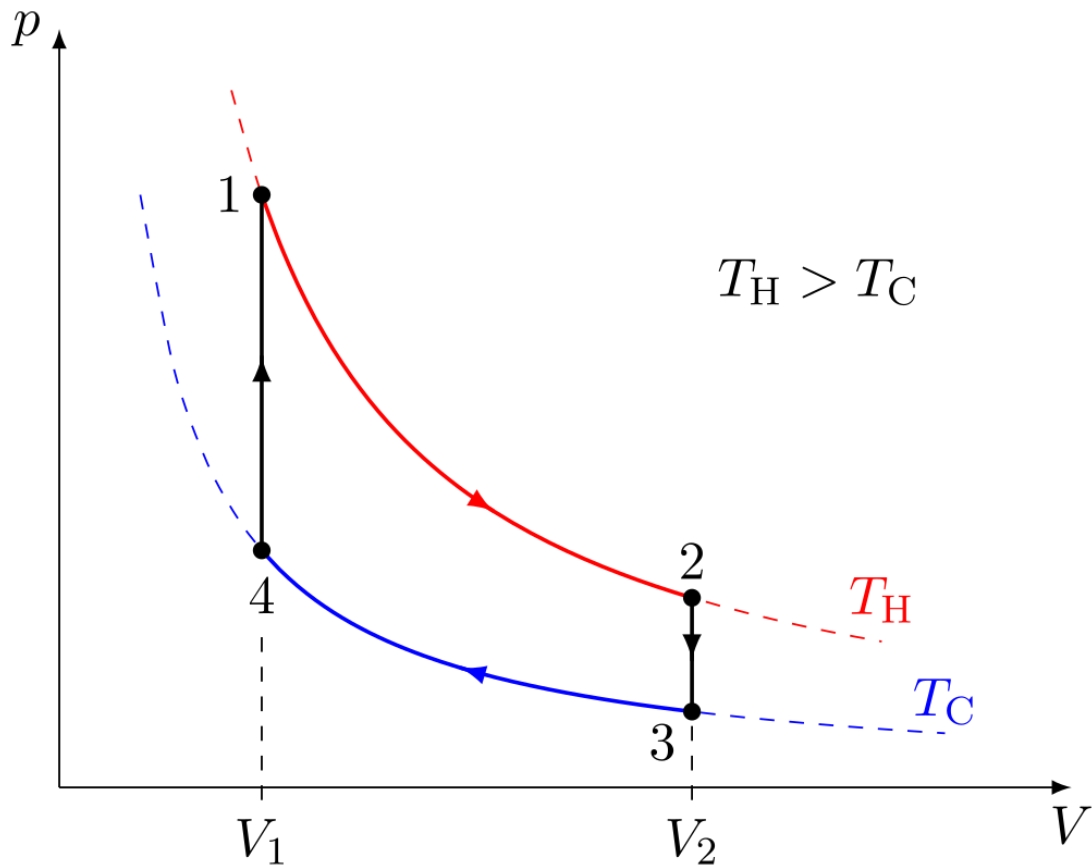


Ilustración 5.4: Ciclo Stirling [58]

En la gráfica anterior podemos observar los cuatro procesos descritos:

- **1-2:** Expansión isotérmica del gas a alta temperatura. Este proceso se corresponde con el aumento de energía que sufre el gas de la probeta cuando ha sido calentado por la fuente de calor. Este se expande y aumenta su volumen, empujando el pistón.
- **2-3:** Cesión de una cantidad de calor a volumen constante (isocórico), disminuyendo la temperatura del fluido. Una vez que el gas se ha expandido, y ha ocupado la mayor parte de la zona de enfriamiento, empieza a disiparse el calor a través de las paredes.
- **3-4:** Compresión isotérmica del gas a la temperatura inferior. Este proceso se corresponde con la compresión del gas en la cámara del cilindro principal, al volver el pistón a su posición original, presionando el gas. Este, al permanecer en la sección de enfriamiento ha reducido su energía, y se comprime más fácilmente.
- **4-1:** Absorción de calor a volumen constante. El gas, ante la compresión sufrida, se filtra en la probeta, circulando alrededor del desplazador y accede a la zona caliente. Allí, la fuente calor eleva la temperatura del gas,

aumentando la presión que ejerce. Esto nos lleva al punto de partida, cuando el gas, habiéndose calentado, inicia su expansión isotérmica.

Un dato muy importante que ya ha sido reseñado es que el proceso de compresión requiere menos trabajo intrínseco que el de expansión, al tener el gas menos energía, al estar a baja temperatura, y por tanto ofrecer menos presión y resistencia.

Estas características hacen del motor Stirling, y del ciclo que sigue un proceso fundamentalmente eficiente, casi similar, al menos en entornos teóricos, a la eficiencia del ciclo de Carnot.

5.2. - Motor Webster

5.2.1. - DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO

El motor Webster que se ha diseñado para el presente Trabajo se trata de un *motor de combustión interna de cuatro tiempos*. Un motor de combustión interna es un motor térmico en el cual la combustión del combustible ocurre al entrar en contacto con un oxidante (generalmente aire) en una cámara de combustión, que ocupa una parte integral del circuito por el que circula el fluido que mantiene en marcha el motor [59].

Dentro de esta cámara de combustión, la expansión de los gases a una alta temperatura y una consecuente alta presión implicará el desplazamiento de ciertas partes del motor, como válvulas, pistones y cigüeñales, que aprovecharán este movimiento para accionar, cerrar o abrir conductos, motivando el movimiento cíclico del motor, y a su vez, se obtendrá de este un movimiento rotatorio que será extraído y aprovechado; en definitiva, el objetivo último del motor es la transformación de la energía generada por la quema de ese combustible en un movimiento mecánico aprovechable.

Así, en base a lo mencionado anteriormente, podemos distinguir ya una de las principales diferencias con el motor Stirling descrito en el apartado anterior: mientras que este último era un motor de combustión externa, donde la fuente de calor se utilizaba para el calentamiento de un fluido sin contaminar (aire) y que permanecía constante dentro del sistema, en el caso del motor Webster tendremos que al aire que se introduzca en el sistema se le añadirá un combustible, normalmente gasolina o combustible diésel, produciéndose la quema de ambos dentro del motor. Así mismo, esto implica que tanto el aire como el combustible deben ser renovados cíclicamente, por lo que, en este caso, ya no tenemos un sistema cerrado [59].

Los motores de combustión interna poseen varias clasificaciones, siendo el discernimiento más habitual la diferenciación entre motores de dos tiempos y motores de cuatro tiempos. Si bien existen otras clasificaciones y una mayor ramificación de estas, en el presente texto nos centraremos en ofrecer una explicación sucinta del motor

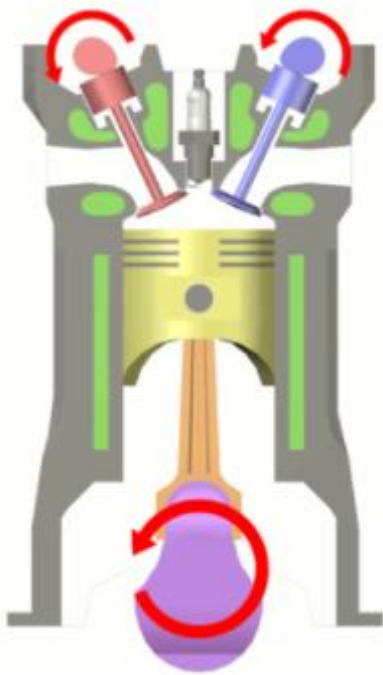


Ilustración 5.5: Esquema básico de un motor de combustión interna de cuatro tiempos [63]

dentro del cual se desplaza, en un movimiento alternativo cíclico de avance y retroceso un pistón. Este está conectado a un cigüeñal, el cual transformará el movimiento rectilíneo del pistón en un movimiento rotatorio. Este será el movimiento que se extraiga del motor para su posterior aprovechamiento, según la máquina o constructo en el que esté implementado.

El cilindro está cerrado en su parte posterior por dos válvulas, conectadas a sendas levas en configuración asíncrona, lo que implicará que estas se abrirán y cerrarán de forma alternativa. Una de las válvulas abrirá el conducto de admisión por el que la mezcla de aire y combustible entrará a la cámara de combustión; la otra está localizada en el tubo de escape, por el cual se expulsarán los restos de la combustión.

Un breve comentario que debe hacerse por precisión es que se ha especificado que por la válvula de admisión entrará una mezcla de aire y combustible, que luego se quemará en la cámara; este es, efectivamente, el caso de nuestro motor. Sin embargo, debe reseñarse que otra opción habitual es que por la vía de entrada solo entra el componente gaseoso, y el combustible es añadido posteriormente por un conducto superior en el instante preciso de la combustión. La diferencia entre estas dos opciones se basa en el tipo de motor de combustión interna de cuatro tiempos que estamos analizando, pudiendo ser estos de tipo Otto, para el primer caso, o diésel, para el segundo, llamados así por el ciclo termodinámico que se cumple en cada caso. En el caso del motor Webster que nos ocupa, se cumple el ciclo de Otto, y como se ha comentado, a la cámara de combustión ingresará una mezcla de aire y combustible [59].

de combustión interna de cuatro tiempos, que es, al fin y al cabo, aquel dentro del cual se clasifica el motor Webster diseñado. Como un breve comentario, que se ampliará a continuación, la diferencia entre los dos tipos de motores de combustión interna mencionados consiste en que el motor de cuatro tiempos completa su ciclo de trabajo englobando dos vueltas del cigüeñal y cuatro carreras del émbolo o pistón, mientras que el motor de dos tiempos es una versión simplificada que, al finalizar su ciclo, ha completado una sola vuelta del cigüeñal, y dos carreras del émbolo [60]-[62].

Así pues, describiremos a continuación como realiza su ciclo de trabajo un motor de cuatro tiempos.

Como puede observarse en la imagen adjunta, la configuración básica de un motor de cuatro tiempos consiste en un cilindro principal,

Pasaremos a continuación a describir el funcionamiento intrínseco del motor:

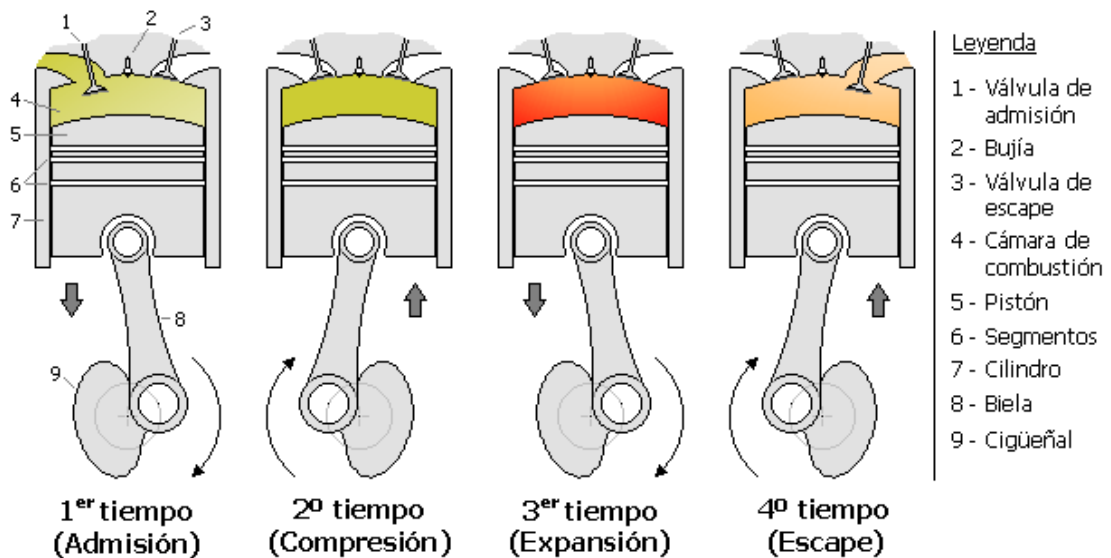


Ilustración 5.6: Ciclo de funcionamiento de un motor de combustión interna de cuatro tiempos [64]

La anterior imagen puede ayudarnos a entender como es el ciclo de funcionamiento del motor, así como nos ofrece una primera idea anticipada del porqué tiene la clasificación de “cuatro tiempos”. El motor presentará una serie de movimientos cíclicos que alternarán entre las carreras de avance y retroceso del pistón, y las aperturas de las válvulas superiores. Dentro de este ciclo encontraremos situaciones de expansión y contracción, que serán impulsoras del movimiento. Así, ofreciendo un desgrendado completo del proceso:

1. **Primer tiempo o admisión:** en esta fase la válvula de admisión debe estar abierta. Así mismo, nos encontraremos con que el pistón, en esta fase, descenderá. Este descenso del pistón producirá un efecto de succión, aspirando la mezcla de aire y combustible al interior de la cámara de combustión. La válvula de escape, por supuesto, debe permanecer cerrada. Esta fase continúa hasta que el pistón llega al punto más bajo de su recorrido, momento en el cual la cámara de combustión está llena de la mezcla, y la válvula de admisión se cierra.
2. **Segundo tiempo o compresión:** como se comentó al final de la sección anterior, el pistón llega al final de su carrera y la válvula de admisión se cierra, dándose comienzo a esta fase. Ahora, con ambas válvulas retraídas y por tanto, con los dos conductos cerrados, el pistón comienza a ascender, comprimiendo la mezcla de gas y combustible.
3. **Tercer tiempo o explosión/expansión:** una vez el pistón llega al final de su carrera superior, la compresión infligida sobre la mezcla de aire y combustible es máxima; es en este momento cuando se produce la ignición

de la mezcla, conocida como explosión. Esta puede producirse bien por la aportación de una chispa producida por un elemento localizado en la parte superior, conocido como bujía, o bien simplemente por calentamiento por la alta presión alcanzada. Al producirse la combustión, como es de esperar, se produce un rápido y sustancial incremento de la temperatura y la presión de los gases contenidos en la cámara, los cuales “empujan” el pistón, desplazándolo nuevamente hasta su posición inferior. Inferimos aquí que esta es la fase del ciclo en la que se obtiene trabajo, puesto que son los gases los que están desplazando el pistón, sin necesidad de aporte de energía al sistema. Este trabajo, traducido en el consecuente giro del cigüeñal al descender el pistón, se aprovecha en el resto de la maquinaria conectada.

- 4. Cuarto tiempo o escape:** en esta última fase se abre la válvula de escape. El pistón, que en la fase anterior alcanzó nuevamente la posición más baja de su recorrido, empieza a ascender, “empujando” en el proceso los gases resultado de la combustión, que son expulsados por el tubo de escape. La fase continúa hasta que el pistón se coloca en el extremo superior de su recorrido, momento en el que se cerrará la válvula de escape. En este instante se abrirá la válvula de admisión, y el pistón empezará a descender, reiniciándose así el ciclo y volviendo a la primera fase [59]-[61], [63]-[64].

Así pues, del mismo modo que realizamos anteriormente con el motor Stirling, resulta ahora sencillo enlazar el proceso descrito con las particularidades de nuestro propio diseño.

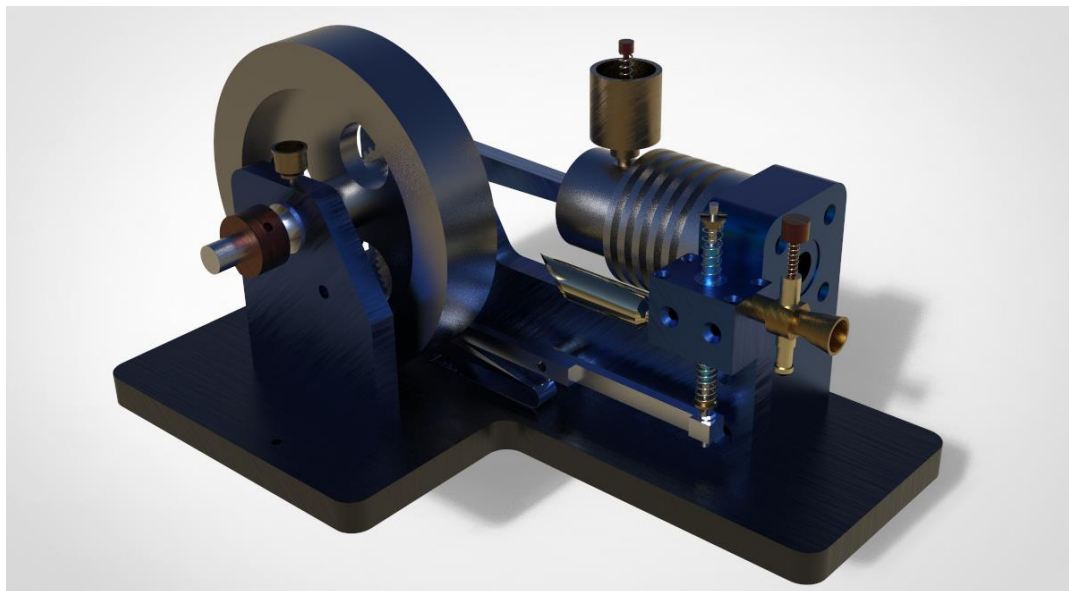


Ilustración 5.7: Motor de combustión interna de cuatro tiempos estudiado en este Trabajo (motor Webster)

Habiendo detallado los elementos característicos de un motor de combustión interna de cuatro tiempos, así como su interacción, resulta fácil ahora identificarlos en nuestro diseño.

Así, podemos distinguir el cilindro, que actúa como cámara de combustión, dentro del cual se desplaza el pistón en su movimiento cíclico. Recordemos así mismo el diseño de la caja de válvulas, que constaba de 3 secciones diferenciadas. La parte central presentaba un conducto que conectaba con la sección del cilindro, mientras que la inferior y superior tenían orificios en sus laterales, a los cuales están conectados los conductos de admisión del combustible y el tubo de escape. La apertura y cerrado de las válvulas están organizadas en un movimiento alternativo, fijándonos en que la inferior está conectado al sistema cerrado del motor al ser accionada de forma consecutiva en su parte inferior por el sistema del balancín y la pieza que actúa de muelle.

Así pues, este motor Webster sigue paso por paso el procedimiento habitual de cuatro tiempos anteriormente descrito. La válvula superior se consideraría abierta en la primera fase, y, supuesto conectado un depósito de combustible a la entrada de la sección superior de la caja de válvulas, el retroceso del pistón succionaría ese combustible dentro del motor. Este se introduciría en la caja de válvulas y pasaría al cilindro por el conducto de la parte central. Con ambas válvulas ahora cerradas, el pistón avanzaría, comprimiendo la mezcla de aire y combustible que habría dentro del cilindro, calentándola en el proceso, hasta provocar la ignición. Esta, con su consecuente aumento de la energía y la presión, haría retroceder el pistón, hasta que llegara al final de su recorrido. En este momento se abriría la válvula de escape, y el pistón retomaría el camino de avance, expulsando los gases por el tubo de escape.

Debemos reseñar además que este motor presenta varias particularidades que se revelan como decisiones de diseño muy acertadas, que contribuyen a un mejor desempeño de la funcionalidad del motor. La más evidente, por cuestión visual, es la añadidura de un volante de inercia. Como sabemos, su función es acompañar y acompasar el movimiento, permitiendo con su inercia que las piezas mantengan su movimiento con menor trabajo del requerido, debido a la energía mecánica acumulada.

Así mismo, otra decisión de diseño, pero que se revela muy inteligente, es la atípica colocación del tubo de escape. Podemos observar que este está orientado hacia dentro del motor, apuntando directamente a la sección del volante de inercia y el sistema de engranajes. Esto es completamente intencional; al tratarse de gases resultado de la combustión de un carburante, normalmente gasolina o similares, estos presentan en su composición un cierto nivel de aceitosidad. Por ello, al orientar el tubo de escape por el que estos saldrán hacia la sección de engranajes, que es una parte crítica del motor, podemos aprovechar estos mismos gases de escape para lubricar estas piezas.

Finalmente, debemos señalar la pieza cilíndrica de coloración rojiza que ha sido colocada al final del extremo del cigüeñal. Según el diseño mostrado del motor, este está pensado para añadir a continuación de esa sección algún elemento que aproveche el movimiento rotatorio del cigüeñal. Esto discurre a como habíamos señalado en la

explicación previa, donde el objetivo del motor es provocar el avance y retroceso del pistón, y transformar ese movimiento rectilíneo en un rotatorio alternativo. Así pues, conectado a este final del eje del cigüeñal se conectaría algún tipo de alternador o generador, que pudiera transformar esa energía mecánica en eléctrica.

Con respecto a esto último, debe recordarse, como ya se ha mencionado antes en el texto, que el diseño aquí mostrado del motor Webster solo atañe a los elementos intrínsecos del motor; elementos como el generador que se acaba de mencionar, o la conexión a un tanque de combustible, que se enlazaría a la caja de válvulas, son libres de la elección del diseñador y no se incluyen en los diseños aquí mostrados.

5.2.2. - CICLO OTTO

A continuación, al igual que hicimos con el motor Stirling, describiremos el ciclo termodinámico por el que se rige el motor Webster. Esto nos permitirá hacernos una idea más completa de su funcionalidad y de sus características energéticas.

Como se comentó anteriormente, un motor de combustión interna de cuatro tiempos como el que nos ocupa puede regirse, según su funcionamiento, según un ciclo Otto o un ciclo Diésel [63]. El motor Webster que hemos diseñado está englobado dentro de los motores que siguen el ciclo Otto, por lo que será en este en el que centraremos nuestro análisis.

Así, el ciclo Otto es el ciclo termodinámico considerado por excelencia como el que mejor describe el proceso descrito de funcionamiento de un motor de combustión interna de cuatro tiempos [65], pues en su desarrollo se analiza los cambios acaecidos a una cierta masa de gas cuando esta es sometida a cambios de presión, temperatura, volumen y adición o sustracción de calor, que es justamente lo que ocurre durante el trabajo del motor sobre el que tratamos [66].

Analizando a continuación en mayor profundidad las etapas de un ciclo Otto:

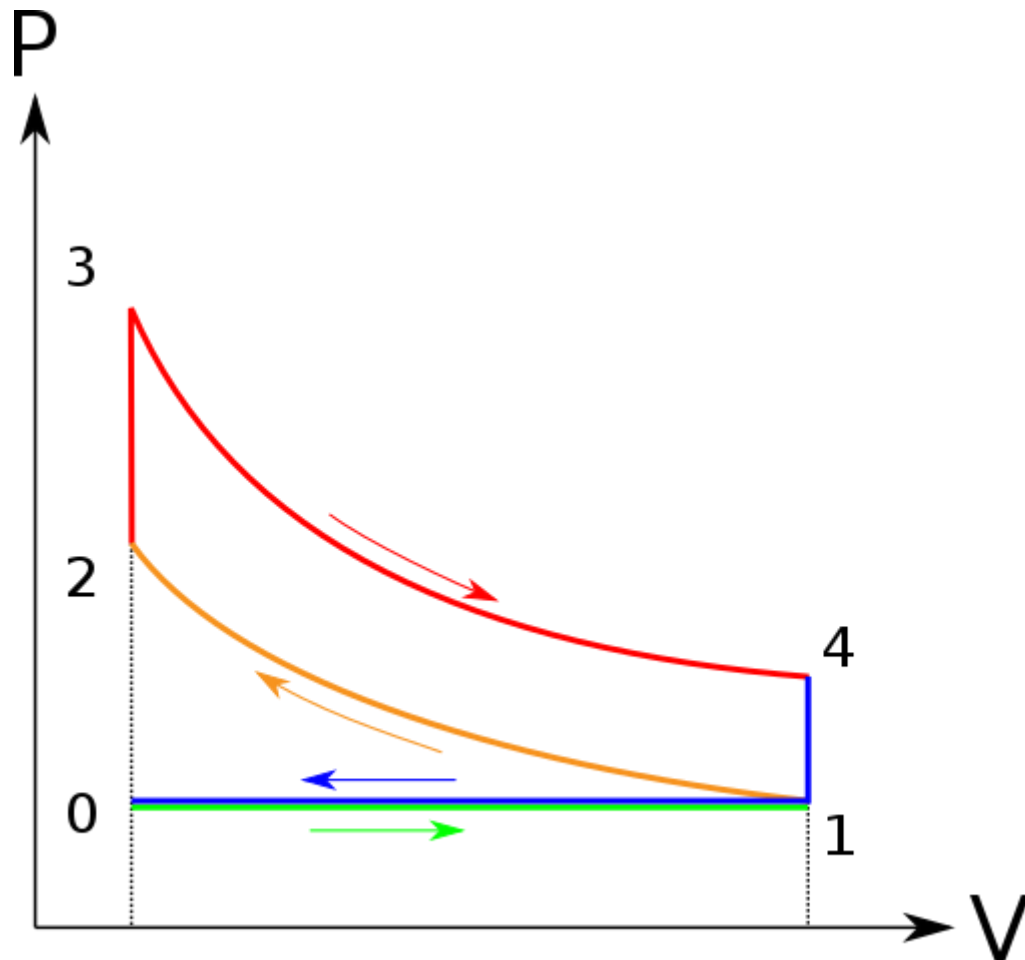


Ilustración 5.8: Ciclo Otto [66]

Como puede observarse, el ciclo está compuesto por dos procesos isentrópicos (con entropía constante) y dos procesos isocóricos (a volumen constante). Debe reseñarse que las dos líneas superpuestas inferiores, correspondientes a los procesos de admisión y escape, no forman parte como tal del ciclo termodinámico, pero son fundamentales pues este requiere de una renovación de la carga de fluido sobre la que actúan los procesos.

Desgranando las fases del ciclo [67]:

- **0-1:** admisión de un gas en el sistema a presión constante. Este es el primer paso de la mencionada renovación de la carga de fluido, y se produce cuando el pistón, en su retroceso, succiona la mezcla de aire y combustible.
- **1-2:** Compresión isentrópica de los gases. Acaecida cuando el pistón empieza a comprimir la mezcla en la cámara de combustión.
- **2-3:** Combustión a volumen constante. Esta fase se da cuando ocurre la ignición del gas contenido en la cámara, bien producida por una chispa o por

el propio aumento de la presión que ha ocurrido previamente. Esta combustión implica un rápido aumento de la presión del sistema.

- **3-4:** Expansión isentrópica. Al haber aumentado la presión que ejerce el gas después de la combustión, este desplaza el pistón, expandiéndose y aumentando su volumen.
- **4-1:** Proceso a volumen constante en el que el gas, habiendo empujado el pistón, cede trabajo y disminuye progresivamente la presión que ejerce.
- **1-0:** escape del gas resultado de la combustión en un proceso isobárico. Una vez se ha completado el ciclo, se abre la válvula de escape y el gas escapa fuera, empujado por el pistón, completándose así la renovación de fluido en el sistema.

Como puede observarse, el proceso 1-2 requiere de una entrega de trabajo al sistema, mientras que en el 3-4 es el propio gas el que ejerce el trabajo. El ciclo Otto aquí descrito se revela como un sistema de obtención de trabajo bastante eficiente, pues este trabajo obtenido en el desarrollo del ciclo supera ampliamente el invertido; de ahí que estos motores sean ampliamente utilizados para mover máquinas de gran envergadura, como automóviles.

Debe señalarse que el rendimiento particular de los motores que utilizan este ciclo viene definido principalmente por la relación de compresión, que es la proporción entre los volúmenes máximo y mínimo encontrados en la cámara de combustión, según el desplazamiento del pistón [68]. En el caso de nuestro motor, ideado para trabajar a baja escala, el ajuste del pistón dentro del cilindro principal no es extremo, amén del volumen extra proporcionado por la caja de válvulas. Esto hará que su relación de compresión no sea extremadamente eficiente, pero es suficiente para una generación de energía capaz de sostener máquinas pequeñas o mantener circuitos de baja intensidad.

6. - CONCLUSIONES

Llegados a este punto del presente Trabajo, una vez que se ha suplido el objetivo principal enfocado en el diseño asistido por ordenador de los motores, y habiendo realizado un análisis exhaustivo de su funcionamiento y su termodinámica, lo cual nos ha permitido hacernos una idea global de las principales características y capacidades de estos motores, se procede a cumplir en este apartado otro de los objetivos de mayor interés de este Trabajo de Fin de Grado: se realizará una comparación sucinta entre ambos motores, lo cual nos permitirá resaltar sus mayores fortalezas, así como sus espectros de mejora.

Para la realización de esta comparación, por sencillez, se enunciarán las principales ventajas y desventajas de ambos motores, tras lo cual nos resultará sencillo establecer las diferencias principales entre las dos máquinas; más allá, obviamente, de su funcionamiento intrínseco.

6.1. - Motor Stirling

6.1.1. - VENTAJAS

- Los motores Stirling pueden funcionar utilizando cualquier tipo de fuente de calor, no necesariamente una combustión, como suele ser el caso de la mayoría de los motores [69].
- Así mismo, la aportación de calor aplicada a un motor Stirling suele ser habitualmente continua, sin interrupciones; esto representa una reducción de las emisiones contaminantes encontradas en los casos de aportaciones de calor cíclicas.
- Presentan una mayor sencillez relativa en comparación con otros motores de características similares; carecen de válvulas, y los sistemas de combustión suelen ser más simples [70].
- Los motores Stirling, como ya se ha indicado en apartados anteriores, trabajan en un ciclo cerrado, utilizando gas como fluido. Este gas no cambia de estado en ningún momento, ni recibe añadidos de combustibles o similares en otras fases [15]. Esto aumenta la estabilidad general del motor, y en los momentos de alta compresión, reduce las posibilidades de que ocurra una explosión o algún tipo de fallo en el sistema.
- Su encendido inicial es sencillo (aunque ciertamente lento) y funcionan de forma eficiente en condiciones ambientales frías. Esto ofrece un contraste con los motores de combustión interna, que, si bien inician bien su funcionamiento en ambientes cálidos, presentan problemas a bajas temperaturas.

- Los motores Stirling presentan una gran versatilidad, pudiendo ser utilizados como fuentes de calor y trabajo en invierno, y como enfriadores en fechas más cálidas [15].
- El calor residual sobrante producido por un motor Stirling es aprovechado fácilmente, especialmente en comparación con los motores de combustión interna.

6.1.2. - DESVENTAJAS

- Los motores Stirling requieren intercambiadores de calor, debiendo tener en cuenta que las temperaturas alcanzadas por el fluido en el interior del circuito del motor pueden llegar a ser muy elevadas. Así mismo, estas piezas deben soportar correctamente la presión alcanzada por dicho fluido. Esta es proporcional al trabajo que está obteniendo el motor; por lo tanto, en motores Stirling de alta gama, se alcanzarán valores de presión muy altos. Esto nos conduce a que los materiales que compongan estas piezas deben ser capaces de aguantar los efectos adversos de altas temperaturas y altas presiones a la vez. Esto invariablemente conduce a un aumento sustancial del coste del motor; los materiales de las piezas intercambiadoras de calor pueden llegar a suponer el 40% del coste total [13].
- Incidiendo sobre el último comentario, las altas temperaturas alcanzadas por el motor pueden exceder los límites soportables de los materiales, incluso con las consideraciones previas. Esto lleva a que un motor Stirling nunca podrá operar al máximo de su capacidad, según lo establecido por la teoría del ciclo Stirling. Recordemos que este era un ciclo ideal, y, por lo tanto, no es realista esperar una eficiencia máxima. Estas altas temperaturas de trabajo son una de las principales razones por lo que estos motores tienen un buen desempeño en climas fríos [15].
- Los motores Stirling suelen tener una mala proporción entre tamaño y trabajo; es decir, suelen bastante grandes para obtener cantidades de trabajo moderadas [71]. Esto se acentúa cuando el diferencial de temperatura sobre el que trabaja el motor es pequeño (como es el caso del motor diseñado en este Trabajo, el cual, si bien tiene pequeñas dimensiones, ciertamente el trabajo que produce es muy reducido). Esto es otra nota de contraste con los motores de combustión interna, que no presentan estos problemas [15].
- Un motor Stirling no puede arrancar de forma instantánea, requiriendo, literalmente, un “calentamiento” inicial. Si bien esto es aplicable a cualquier motor de combustión externa, en el caso de los motores Stirling es muy pronunciado, y es una de las grandes desventajas que presentan frente a los motores de combustión interna.
- Por el método de funcionamiento que presentan los motores Stirling, la obtención de trabajo es continua y constante. El correcto aprovechamiento de

esta fuente de trabajo requiere un diseño exhaustivo y, en algunos casos, componentes adicionales.

- En relación con el primer punto, que versaba sobre las altas temperaturas y presiones alcanzadas por el fluido en el interior del motor, esto nos lleva a que hay que hacer una cuidadosa consideración del gas a utilizar. El uso del aire, por ejemplo, como gas de trabajo, si bien reduce sustancialmente los costes, introduce oxígeno en un entorno de trabajo altamente presurizado, lo cual puede conducir a accidentes fatales [72]. En este sentido, se ha estudiado el helio como el gas más adecuado para los motores Stirling [13], [15].

6.1.3. - APLICACIONES Y DESARROLLO FUTURO

Las últimas aplicaciones encontradas para el motor Stirling demuestran que, en muchos casos, este motor es subestimado, en gran medida por el desconocimiento general que existe en torno a sus capacidades, y especialmente por la fuerte competencia de otros motores más conocidos. Sin embargo, se ha demostrado que pueden encontrarse nichos de mercado asegurados para este tipo de motor, amén de que presenta características que lo hace muy diferente a otros motores actuales, implicando esto la existencia de tareas en las que este tipo de motor puede mostrar su excelencia.

Históricamente se ha aceptado que los motores Stirling no son adecuados para su incorporación en cuestiones de automovilística, debido a su ratio de trabajo frente a peso demasiado bajo, así como a las altas temperaturas a las que debe funcionar para trabajar a gran escala, por no mencionar sus largos tiempos de arranque. Sin embargo, en los últimos años se han examinado líneas de investigación que combinan el motor Stirling con motores de combustión interna, con resultados prometedores que podrían acabar derivando en la superación de las limitaciones consistentes en el bajo ratio de trabajo frente a peso anteriormente mencionado, así como de su lenta capacidad de aceleración [73].

Así mismo, en relación directa con el párrafo anterior, dado que sigue siendo difícil encontrar un compromiso entre las desventajas que presenta el motor Stirling con las exigencias básicas del automovilismo, se ha encontrado una nueva opción en los nuevos coches eléctricos. Los motores Stirling son excelentes generadores de energía, y aunque siguen presentando limitaciones graves, puede ser más sencillo examinar su incorporación en este nuevo mercado, puesto que en el tradicional siguen reinando los motores actuales de combustión interna [74]-[75].



Ilustración 6.1: Submarino clase Söryü [78]

Como se mencionó anteriormente, uno de los nichos más inesperados y exitosos del motor Stirling se ha encontrado en los motores enfocados a la navegación subacuática, habiéndose incorporado en los submarinos Gotland y Södermanland suecos, o los Sōryū japoneses. En estas aplicaciones, los motores Stirling han demostrado capacidades de actuación a la par que las presentadas por submarinos alimentados por energía nuclear, siendo capaces de extender la autonomía de los submarinos donde se ha implementado de unos pocos días a varias semanas [76]-[77].

En cuestiones de generación de energía, los motores Stirling tienen una alta presencia como motores de cogeneración (motores CHP), esto es, motores que producen tanto energía mecánica como térmica a partir de su funcionamiento base [79]. Esto hace de estos motores un referente de versatilidad; mientras que lo habitual sería aprovechar la energía mecánica, como en las aplicaciones eléctricas, la capacidad de los motores Stirling para aprovechar también la energía térmica que desprenden los pone como punta de lanza en este sector [80].



Ilustración 6.2: Motor Stirling solar en la Plataforma Solar de Almería (España) [82]

Sin embargo, han encontrado un nicho de mercado más extenso aún en la industria de la energía solar, capaces de generar energía con una eficiencia igual o superior al de las células fotovoltaicas habituales [81].

También se han encontrado usos en la generación de energía nuclear, donde la incorporación de los motores Stirling podría incluso aumentar la eficiencia, y reducir enormemente la generación de residuos tóxicos.

Finalmente, uno de los usos más popularizados del motor Stirling hoy en día es en sistemas de refrigeración y criogenización. Debe hacerse especial hincapié en esta aplicación, pues está definida a día de hoy como la más importante y con mayor futuro y potencial de todas las mencionadas. Si bien hay motores que pueden mostrarse competitivos con el Stirling a temperaturas de enfriamiento reducidas (hasta los -40°C), un motor Stirling puede hacer descender la temperatura, sin suponer un problema de logística, hasta los -200°C . Esto es una muestra extraordinaria de su potencia, que, combinada con otras características, como su ruido casi nulo, la ausencia de vibraciones, la capacidad para ser

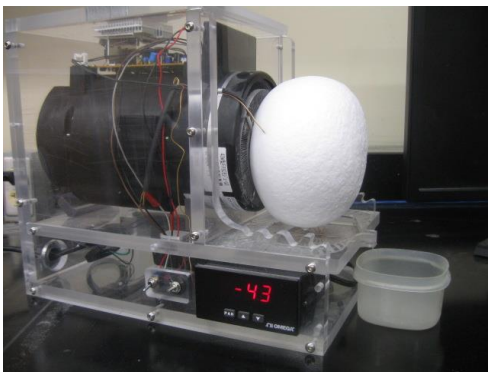


Ilustración 6.3: Global Cooling Stirling Cooler expuesto en la universidad de Ohio [55]

fabricados en escalas muy reducidas y su mantenimiento sencillo, han hecho del motor Stirling líder en aquellas aplicaciones que requieran de estas funciones, como es por el ejemplo el enfriamiento de sensores electrónicos o microprocesadores. La mención de este tipo de sistemas, que no son sino opciones de futuro, nos muestra que podemos esperar la aparición del motor Stirling en tecnologías punteras de vanguardia [83]-[84].

6.2. - Motor Webster

6.2.1. - VENTAJAS

- Muchos de los motores de combustión interna queman algún combustible líquido, normalmente gasolina y sus derivados o similares [59], cuya combustión acarrea una gran cantidad de elementos contaminantes. Su quemado suele producir gases contaminantes, que pasan al ambiente, y, por otro lado, también se producen impurezas y otros restos sólidos. Algunos son expulsados al exterior del motor, pero la mayoría de estos permanecen en su interior, acumulándose sobre las válvulas o en los conductos, llegando a afectar severamente al trabajo del motor. En ese sentido el motor Webster, que utiliza fundamentalmente gas como fluido de combustión, es mucho más limpio, tanto para el medio ambiente como para el propio motor, sin que afecte a sus capacidades.
- Debido, entre otros factores, al combustible gaseoso anteriormente mencionado, se ha comprobado que el motor Webster presenta unos costes muy reducidos. Efectivamente, este combustible es más barato de obtener, y en relación con el comentario anterior, su mantenimiento es más sencillo, abaratando de forma general los costes implicados.
- Relacionado de forma directa con los apartados anteriores, en el sentido ecológico y económico, al tratarse de un motor de firma conocida, pero que utiliza un combustible que genera unos niveles de contaminación muy por debajo de otros motores más convencionales, su desarrollo suele contar con el beneplácito de las organizaciones gubernamentales que apoyan el desarrollo de una tecnología más ecológica y sostenible. Esto suele traducirse en ayudas, subvenciones e incentivos.
- En cuestiones técnicas, a diferencia de los motores Stirling, un motor de combustión interna presenta un arranque mucho más cómodo y rápido, con tiempos de espera para que inicie su funcionamiento óptimo muy cortos.
- Los motores de combustión interna, si bien presentan una eficiencia general moderada (puesto que el ciclo Otto que siguen queda lejos de un ciclo ideal cercano a Carnot, como sí es el caso del ciclo Stirling), tienen una relación de tamaño e inversión de energía frente al trabajo producido muy notable. Incluso

aunque un motor Stirling pudiera alcanzar mayor eficiencia en una situación dada, requeriría de una maquinaria mucho más grande y aparatosa que la que requeriría un motor de combustión interna como el Webster. Ante la misma inversión en materiales, este último podría generar mayor trabajo.

6.2.2. - DESVENTAJAS

- A pesar de las ventajas anteriormente mencionadas acerca de usar gas como combustible principal, es cierto que este posee un poder energético mucho menor al de los combustibles convencionales, como la gasolina. Además, aunque han sido adaptados convenientemente, este tipo de motores están ideados para trabajar eficientemente con este último tipo de combustible. Todo ello hace que el motor Webster, esto es, un motor de combustión interna de gas, suponga un ligero retroceso en lo que a eficiencia y aprovechamiento se refiere. Una solución de compromiso que se suele alcanzar para mantener una buena eficiencia, sin perder las ventajas adquiridas por la incorporación del gas, es usar este para el encendido del motor y su funcionamiento a bajas revoluciones, pasando a gasolina si se requiere una generación de trabajo mayor.
- En relación directa con lo mencionado anteriormente, para poder mantener niveles de funcionamiento óptimos, este tipo de motores requiere un influjo de carburante mucho mayor, es decir, un aumento del consumo del motor bastante considerable.
- Un problema que puede pasar desapercibido es la escasa infraestructura que rodea a este tipo de motores, puesto que su aplicación efectiva es bastante reciente. Esto implica que la adquisición del combustible, su almacenamiento y su transporte son problemáticas. Así mismo, la legislación, así como un conocimiento general de la población y un uso extendido que permita introducirlo en el mercado, son apartados que aún están en fases tempranas de desarrollo.
- A diferencia de los motores Stirling, que generan trabajo de forma continua y constante, el motor Webster se trata de un motor de combustión interna de cuatro tiempos; como su propio nombre indica, su funcionamiento se basa en una serie de ciclos o intervalos, lo cual implica que hay momentos durante los cuales el motor no está produciendo energía [63]. Esta es una de las razones por las que podemos considerar que pierden en el campo de la eficiencia frente a los motores Stirling.
- Debido a sus características, este tipo de motores sufren en entornos gélidos, siendo en algunos casos extremadamente difícil conseguir un arrancado adecuado, o mantener posteriormente su correcto funcionamiento.
- Como puede observarse de forma sucinta en los apartados de diseño de este mismo trabajo, los motores de combustión interna, como el caso del motor Webster que nos ocupa, presentan mayor complejidad en su diseño y

fabricación. La inclusión de piezas como válvulas, bujías, y sistemas de apertura y cierre, a diferencia del motor Stirling, que presenta una estructura cerrada más simple, hace que los motores de combustión interna requieran un esfuerzo mayor en su concepción y creación.

6.2.3. - APLICACIONES Y DESARROLLO FUTURO

Los motores de combustión se han revelado como una de las invenciones más versátiles dentro de la ingeniería de la energía. Su desarrollo ha sido ampliamente estudiado, por lo que se tiene un gran conocimiento sobre estos, lo cual no es óbice para que cuenten con un gran margen de mejora.

Hoy en día, los motores de combustión interna se cuentan entre las principales fuentes de energía para vehículos tanto terrestres como marinos. Su uso dentro del campo del automovilismo está más que aposentado, siendo uno de los motores clásicos con más recorrido en esta área. Históricamente han utilizado gasolina o gasoil como principales carburantes, lo cual ha provocado que siempre hayan estado bajo una visión crítica desde el punto de vista del ecologismo y el desarrollo sostenible. La llegada de los nuevos motores eléctricos podría suponer una amenaza obvia para estos motores; sin embargo, las nuevas líneas de investigación basadas en sustituir estos combustibles por gases han impulsado esperanzas de que estos motores sigan siendo líderes en el sector, puesto que así se supliría la problemática de la contaminación, amén de que estos motores, al menos de momento, siguen ofreciendo posibilidades de potencia mayores que los motores eléctricos. Además, hay que tener en cuenta que la mayor parte de la infraestructura de la industria automovilística está pensada para respaldar a los motores de combustión,



Ilustración 6.4: Motor de combustión interna de cuatro tiempos adaptado para automóvil [88]

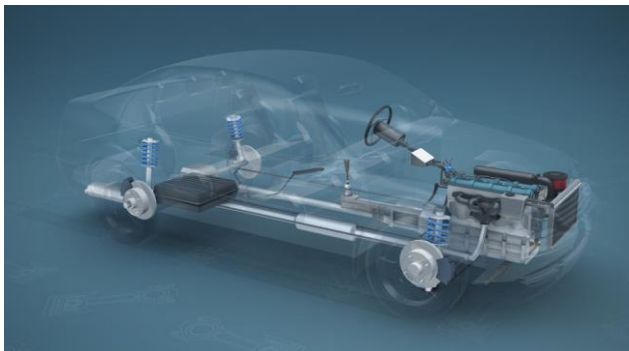


Ilustración 6.5: Disposición interna del motor y transmisiones dentro de un automóvil [90]

por lo que, de ocurrir un cambio de gran extensión, este sería indudablemente lento. Por lo tanto, los motores de combustión interna tienen aún un largo recorrido por delante en esta área [85]-[87].

Fuera de la sección de transportes y automovilismo, el otro gran sector en el que reinan los motores de combustión

interna es el de la generación de energía eléctrica. El propio movimiento rotatorio obtenido en la biela como consecuencia de la actuación del motor puede transmitirse y aprovecharse en sistemas que transformen la energía mecánica en energía eléctrica. Además, en el caso de motores que utilizan aire como combustible, como es el caso de nuestro motor Webster bajo estudio, la ganancia de energía frente al coste aumenta considerablemente. Efectivamente, la inversión que requiere usar combustibles fósiles para hacer funcionar los motores de diseños clásicos abriría un debate sobre su rentabilidad a la hora de generar energía eléctrica (habida cuenta, por supuesto, del debate ecológico paralelo). Sin embargo, la incorporación del carburante gaseoso, mucho más barato, a la par que menos contaminante, soluciona ambos problemas y revela estos motores como una opción de futuro [89]. Además, se están estudiando actualmente métodos para el aprovechamiento de la energía térmica residual producida en el motor durante su funcionamiento, lo cual podría aumentar aún más su eficiencia y rentabilidad en este campo.

Si bien se han mencionado las dos principales áreas de empleo de estos motores, con las consideraciones que siguen haciendo estos motores relevantes en el futuro, hay que tener en cuenta que los motores de combustión interna, dada su versatilidad, están ampliamente incorporados en multitud de tareas y áreas a pequeña escala, como bombas de propulsión de agua, una amplia gama de maquinaria doméstica, como cortacéspedes, radiales o motosierras, o como motores en vehículos de baja categorías como motos de baja cilindrada, motos acuáticas o de nieve.

En definitiva, el motor de combustión interna de cuatro tiempos es un sistema con una historia rica y un desarrollo profundo y extenso, que a pesar del tiempo que se lleva empleado en optimizar su diseño, aún presenta opciones de futuro y mejora.

6.3. - Conclusiones

Antes de iniciar el desarrollo de las conclusiones extraídas en el presente tratado, se muestra en la siguiente tabla un resumen de las principales características extraídas de cada motor:

MOTOR STIRLING	MOTOR WEBSTER
Puede utilizar cualquier tipo de fuente de calor para su funcionamiento.	Requiere determinados combustibles; aunque puede suplirse con la versatilidad del aire, este es menos eficiente en general.
Muy poco contaminante.	Históricamente más contaminante, aunque relativamente suplido con el uso de aire.
Diseño sencillo.	Mayor complejidad de diseño.

Mayor estabilidad y seguridad frente a accidentes.	Históricamente más propenso a accidentes, aunque reducidos con la incorporación del gas.
Inicio lento.	Arranque muy rápido.
Trabajan bien en frío.	Sufren en entornos gélidos.
Versatilidad tanto para producir calor como frío.	Incapacidad para trabajar como enfriador.
Aprovechamiento del calor residual.	El calor residual no se aprovecha y puede resultar problemático.
Altísima exigencia para los materiales de fabricación.	Reduce la necesidad de materiales de alta gama.
Singularmente más caro de fabricar y mantener.	Comparativamente mucho más barato, tanto en su fabricación como mantenimiento.
Pérdida de eficiencia al no poder trabajar en sus condiciones ideales de alta temperatura.	Facilidad para trabajar en sus condiciones ideales de máxima eficiencia, menos problemas de sobrecalentamiento.
Mal ratio de trabajo frente a tamaño.	Relación de trabajo frente a tamaño extraordinariamente positiva.
Relegado a aplicaciones nicho reducidas.	Tremenda versatilidad con aplicaciones amplias en todos los campos.

En contraste con los motores de combustión interna, los motores Stirling se revelan como una opción excelente para introducir el uso de sustancias y combustibles renovables y no contaminantes; como sabemos, nuestro motor Webster, incluso tratándose de un motor que introduce el aire como principal carburante, sigue requiriendo pequeñas aportaciones de combustible fósil para la combustión, con todas las desventajas que implican, aún reducidas. Así mismo, los motores Stirling son mucho más silenciosos, trabajan de forma más suave y tienen unos requerimientos y costes de mantenimiento muy por debajo de los de los motores de combustión interna. Sin embargo, debemos recordar que sus costes generales de materiales son muchísimo más elevados, debido a los altos requerimientos que tienen sus piezas, al estar sometidas a altos niveles de temperatura y presión. Así mismo, recordemos que su eficiencia con respecto al tamaño de la máquina era baja, por lo que estos motores suelen ser excesivamente grandes y aparatosos si se quiere obtener una cantidad de trabajo elevada. Es por ello por lo que estos motores son utilizados en situaciones en las que el trabajo que puedan aportar prima sobre el capital que haya que invertir en su desarrollo. También se introducen en instalaciones estáticas, donde su mayor tamaño y dificultad de movimiento no supone un problema para la ejecución de su funcionamiento.

Sin embargo, no se pueden despreciar de forma tajante los motores de combustión interna de los que también estamos tratando. Un motor Stirling, enfrentado a un motor de este tipo con la misma capacidad de producción de trabajo, tendrá de forma casi segura un mayor coste, y como hemos comentado, será indudablemente más grande y pesado. Esto implica que existirán multitud de aplicaciones en las cuales el motor de

combustión interna será preferente frente al Stirling: el ejemplo más clásico lo encontramos en el automovilismo, donde sería impensable poner a funcionar un coche con un motor Stirling, mientras que los motores de combustión interna están a la orden del día.

Debe hacerse un inciso sobre el tratado tema de que los motores Stirling presentan una eficiencia general mayor. Esta conclusión fue alcanzada en los apartados anteriores sobre los ciclos termodinámicos, al estudiar como el ciclo Stirling queda cerca del ciclo ideal de Carnot de referencia. Sin embargo, téngase en cuenta que esto solo toma como marco de referencia la generación de energía del motor.

En conclusión, nos hallamos frente a una pareja de motores cuyo análisis comparativo es tremendamente interesante. Ambos reinan líderes dentro de los campos de aplicación de cada uno de ellos, siendo realmente difícil para el otro mostrarse competitivo en esas mismas áreas. Esto demuestra que la sustitución total de unos motores por otros aún no es posible, puesto que existen tareas que no pueden ser suplidas, debido a la propia naturaleza del motor. La coexistencia de estos motores es, por lo tanto, algo que debe de esperarse aún durante varios años. Sin embargo, resulta alentador ver características comunes en ambos, que suponen en general un avance en el campo de la ingeniería y el desarrollo de los motores. La introducción del aire, o gases en general, como principal combustible de estos motores, abre la puerta a las energías renovables dentro de un sector que ha estado marcado inexorablemente por la lacra de la contaminación excesiva; siendo precisamente el elemento más importante a destacar de este análisis que estos motores, funcionales, como se ha dicho, con el aire como principal carburante, son competitivos y pueden desplazar de sus respectivos sectores a motores mucho menos comprometidos con el medio ambiente.

Que la eficiencia prima en la generación de la energía es una idea básica e inamovible, pero demostrar que se pueden utilizar motores alimentados con elementos renovables, sin pérdida e incluso ganancia de eficiencia, marca el camino a seguir para un desarrollo de la tecnología más limpio y sostenible.

7. - ANEXOS

7.1. - Bibliografía

- [1] R. Sier (1999). *Hot Air Caloric and Stirling Engines: A History*. (1st (Revised) ed.). L.A. Mair.
- [2] "Amontons' engine", *Hot Air Engines*. [En línea]. Disponible en: <http://hotairengines.org/primitive-air-engine/amontons-1699> [Acceso: 17-08-2021]
- [3] "The Stirling Engine". *Hot Air Engines*. [En línea]. Disponible en: <http://hotairengines.org/closed-cycle-engine/stirling-1816> [Acceso: 17-08-2021]
- [4] "Guillaume Amontons, científico e inventor francés", *Excepcionales*. [En línea]. Disponible en: <https://www.excepcionales.es/2019/01/amontons-sordo-fisico.html> [Acceso: 17-08-2021]
- [5] "Cayley 1807 air engine". *Hot Air Engines*. [En línea]. Disponible en: <http://hotairengines.org/furnace-air-engine/cayley-1807> [Acceso: 17-08-2021]
- [6] "Sir George Cayley, 6th Bt", *National Portrait Gallery*. [En línea]. Disponible en: <https://www.npg.org.uk/collections/search/portrait.php?search=ap&npgno=3977> [Acceso: 17-08-2021]
- [7] "Sir George Cayley's Hot Air Engine, 1837", *Hot Air Engines*. [En línea]. Disponible en: <http://hotairengines.org/furnace-air-engine/cayley-1837/paper-newcomen-society> [Acceso: 17-08-2021]
- [8] "Robert Stirling", *Wikipedia, 2021*. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Stirling [Acceso: 17-08-2021]
- [9] "Robert Stirling's engine patent". *Wikimedia Commons, 2008*. [En línea]. Disponible en: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Robert_Stirling%27s_engine_patent-retouched.png [Acceso: 17-08-2021]
- [10] Howard, Bromberg (2010). *Great Lives from History: Inventors and Inventions*. Salem Press.
- [11] Marsden, Ben (2004). *Oxford Dictionary of National Biography*. Oxford University Press.
- [12] T. Finkelstein; A.J. Organ (2001). *Stirling Engine*.
- [13] C. M. Hargreaves (1991). *The Philips Stirling engine*. Elsevier Science Ltd.
- [14] *Philips Technical Review (1947)*, Vol. 9, No. 4, p. 97
- [15] "Stirling Engine", *Wikipedia, 2021*. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine [Acceso: 17-08-2021]
- [16] Kockums (2009). "The Stirling Engine: An Engine for the Future".
- [17] "Learning about renewable energy". *NREL – National Renewable Energy Laboratory, 2016*.

- [18] “Solar Stirling Engine”, *Western Area Power Administration*. [En línea]. Disponible en: http://www.wapa.gov/es/pubs/esb/1998/98Aug/at_solargen.htm [Acceso: 17-08-2021]
- [19] Jack Kelly (2005), *Gunpowder: Alchemy, Bombards, and Pyrotechnics: The History of the Explosive that Changed the World*. Perseus Books Group.
- [20] “The Four Great Inventions of Ancient China”. [En línea]. Disponible en: <http://php.scripts.psu.edu/users/j/x/jx15764/Group.html> [Acceso: 17-08-2021]
- [21] Joseph Needham (1986). *Military Technology: The Gunpowder Epic*. Cambridge University Press.
- [22] “Portrait of Christiaan Huygens” (1671). RKD – Netherlands Institute for Art History. [En línea]. Disponible en: <https://rkd.nl/en/explore/images/15885> [Acceso: 17-08-2021]
- [23] Galloway, Robert Lindsay (1881). *The Steam Engine and Its Inventors: A Historical Sketch*. London: Macmillan and Co.
- [24] Hills, Richard L. (1989). *Power from Steam: A history of the stationary steam engine*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [25] “Denis Papin”, *Wikipedia*, 2018. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Denis_Papin [Acceso: 17-08-2021]
- [26] “The Pyrèolophore: a new engine principle”, *Nicéphore Niépce House Museum*. [En línea]. Disponible en: <https://photo-museum.org/the-pyreolophore-a-new-engine-principle/> [Acceso: 17-08-2021]
- [27] “Joseph Nicéphore Niépce”, *Wikipedia*, 2011. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Joseph_Nic%C3%A9phore_Ni%C3%A9pce [Acceso: 17-08-2021]
- [28] Robert Henry Thurston (1878), *A History of the Growth of the Steam Engine*. D. Appleton and Company.
- [29] “Samuel Brown”, *Wikipedia*, 2021. [En línea]. Disponible en: [https://en.wikipedia.org/wiki/Samuel_Brown_\(engineer\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Samuel_Brown_(engineer)) [Acceso: 17-08-2021]
- [30] Dugald Clerk (1897). “*Gas and Oil Engines*”, Longman Green & Co.
- [31] “*The Historical Documents*”, *Fondazione Barsanti & Matteucci*, 2009. [En línea]. Disponible en: <http://www.barsantiematteucci.it/> [Acceso: 17-08-2021]
- [32] Friedrich Sass (1962). *Geschichte des deutschen Verbrennungsmotorenbaus von 1860 bis 1918*, Springer, Berlin/Heidelberg.
- [33] “Étienne Lenoir”, *Wikipedia*, 2021. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/%C3%89tienne_Lenoir [Acceso: 17-08-2021]
- [34] “Alphonse Beau de Rochas”, *Wikipedia*, 2017. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Alphonse_Beau_de_Rochas [Acceso: 17-08-2021]

- [35] Gunston, Bill (1999). *Development of Piston Aero Engines (2 ed.)*. Sparkford, UK: Patrick Stephens Ltd.
- [36] “Nikolaus Otto”, *Britannica*. [En línea]. Disponible en: <https://www.britannica.com/biography/Nikolaus-Otto> [Acceso: 17-08-2021]
- [37] “Nicolaus Otto”, *Wikipedia, 2005*. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Nicolaus_Otto [Acceso: 17-08-2021]
- [38] “James Atkinson”, *Findagrave, 2021*. [En línea]. Disponible en: <https://es.findagrave.com/memorial/198780164/james-atkinson> [Acceso: 17-08-2021]
- [39] “PIONEERS OF POWER”, *Gas Engine Magazine, 2021*. [En línea]. Disponible en: <https://www.gasenginemagazine.com/gas-engines/pioneers-of-power/> [Acceso: 17-08-2021]
- [40] Ralph Stein (1967). *The Automobile Book*. Paul Hamlyn Ltd.
- [41] “Karl Benz y la creación del primer automóvil”, *La Vanguardia, 2019*. [En línea]. Disponible en: <https://www.lavanguardia.com/historiayvida/historia-contemporanea/20191125/471783996973/karl-benz-automovil.html#foto-5> [Acceso: 17-08-2021]
- [42] “Carl Benz and the high-speed four-stroke engine”, *Daimler, 2021*. [En línea]. Disponible en: <https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Carl-Benz-and-the-high-speed-four-stroke-engine.xhtml?oid=9361503> [Acceso: 17-08-2021]
- [43] Martin Leduc (2010). *“Biography of Rudolph Diesel”*. Wayback Machine.
- [44] “Early History of the Diesel Engine”, *DieselNet, 2021*. [En línea]. Disponible en: https://dieselnet.com/tech/diesel_history.php [Acceso: 17-08-2021]
- [45] “CATIA”, *Dassault Systèmes*. [En línea]. Disponible en: <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/catia/> [Acceso: 17-08-2021]
- [46] “CATIA, el software que trasciende la tecnología de diseño CAD”, *3Dnatives, 2021*. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/catia-software-tecnologia-cad-080720202/#> [Acceso: 18-08-2021]
- [47] “The DASSAULT SYSTEMES Success Story”, *isicad, 2010*. [En línea]. Disponible en: http://isicad.net/articles.php?article_num=14120 [Acceso: 18-08-2021]
- [48] “CAD software history, 1980-85”, *cadazz, 2004*. [En línea]. Disponible en: <http://cadazz.com/cad-software-history-1980-1985.htm> [Acceso: 18-08-2021]
- [49] “Dassault Systemes Announces Version 5 Release 19 of its Product Lifecycle Management (PLM) Portfolio”, *Dassault Systèmes, 2008*. [En línea]. Disponible en: <https://www.3ds.com/press-releases/single/dassault-systemes-announces->

- [version-5-release-19-of-its-product-lifecycle-management-plm-portfolio/](#) [Acceso: 18-08-2021]
- [50] “*Dassault Systemes Launches V6R2010*”, *Dassault Systèmes*, 2009. [En línea]. Disponible en: <https://www.3ds.com/press-releases/single/dassault-systemes-launches-v6r2010/> [Acceso: 18-08-2021]
- [51] “*CATIA*”, *Wikipedia*, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/CATIA> [Acceso: 18-08-2021]
- [52] “*Solid Edge*”, *Structures.aero*, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://structures.aero/software/solid-edge/> [Acceso: 18-08-2021]
- [53] “*Keyshot - renderizado fotorrealista*”, *Pixel Sistemas*. [En línea]. Disponible en: <https://www.pixelsistemas.com/solid-edge/diseno-mecanico/keyshot> [Acceso: 18-08-2021]
- [54] “*Engranajes*”, *Programa para el Acceso a Electromecánico Of. de 1ª*. [En línea]. Disponible en: <http://polamalu.50webs.com/OF1/mecanica/engranajes.htm> [Acceso: 18-08-2021]
- [55] “*Beta Type Stirling Engines*”, *OhioEdu*, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/beta.html> [Acceso: 18-08-2021]
- [56] “*STIRLING ENGINE - Low power generation design hot air engine*”, *BMC – Basic Mechanical Concepts*, 2013. [En línea]. Disponible en: <http://unnikrishnannta.blogspot.com/2013/05/stirling-engine-low-power-generation.html> [Acceso: 18-08-2021]
- [57] A. Romanelli (2017), *Alternative thermodynamic cycle for the Stirling machine*. American Journal of Physics
- [58] “*Stirling cycle*”, *Wikipedia*, 2021. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_cycle [Acceso: 18-08-2021]
- [59] “*Internal combustion engine*”, *Wikipedia*, 2021. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Internal_combustion_engine [Acceso: 18-08-2021]
- [60] Stone, Richard (1992). *Introduction to Internal Combustion Engines (2nd ed.)*. Macmillan.
- [61] Nunney, Malcolm J. (2007). *Light and Heavy Vehicle Technology (4th ed.)*. Elsevier Butterworth-Heinemann.
- [62] “*Two Stroke Spark Ignition (S.I) Engine*”, *first-hand.info*, 2012. [En línea]. Disponible en: <https://web.archive.org/web/20160809121327/http://www.first-hand.info/TwoStrokeSparkIgnitionEngine.html> [Acceso: 18-08-2021]
- [63] “*Four-stroke engine*”, *Wikipedia*, 2021. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Four-stroke_engine [Acceso: 18-08-2021]

- [64] “Ciclo de cuatro tiempos”, *Wikipedia*, 2021. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_de_cuatro_tiempos [Acceso: 18-08-2021]
- [65] Wu, Chih (2004). *Thermodynamic Cycles: Computer-aided Design and Optimization*. New York: M. Dekker.
- [66] “Otto cycle”, *Wikipedia*, 2021. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Otto_cycle [Acceso: 18-08-2021]
- [67] Moran, Michael J., and Howard N. Shapiro (2008). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics. 6th ed.* Hoboken, N.J
- [68] “Energy Conversion and Heat Engines”, *Electropaedia*, 2005. [En línea]. Disponible en: https://www.mpoweruk.com/heat_engines.htm [Acceso: 18-08-2021]
- [69] Dudek, Jerzy *et al.* (2015). *Landfill Gas Energy Technologies*. Global Methane Initiative. Instytut Nafty i Gazu / US Environmental Protection Agency.
- [70] “Two Can Stirling Engine”, *MAKE: Magazine* (2006). [En línea]. Disponible en: <https://makezine.com/projects/two-can-stirling-engine/> [Acceso: 18-08-2021]
- [71] “The Stirling Engine”, *Electropaedia*, 2005. [En línea]. Disponible en: https://www.mpoweruk.com/stirling_engine.htm [Acceso: 18-08-2021]
- [72] A.J. Organ (2008). *Why Air?* Communicable Insight.
- [73] Hasci, James (2008). *Modified Stirling Engine With Greater Power Density*. National Aeronautics and Space Administration & SolidWorks.
- [74] “Solid Biofuel-Powered Vehicle Technology”, *Preceer Group*, 2009. [En línea]. Disponible en: http://www.preceer.com/Files/Preceer_Data_Sheet_D.pdf [Acceso: 18-08-2021]
- [75] Wickham, S.K. (2008). “*Kamen's Revolt*”. Union Leader.
- [76] Kockums (2011). “*The Kockums Stirling AIP system – proven in operational service*”.
- [77] “*First Improved Oyashio-class boat takes to the water*”, *IHS*, 2007. [En línea]. Disponible en: <https://www.janes.com/error/500?aspxerrorpath=/products/janes/defence-security-report.aspx> [Acceso: 18-08-2021]
- [78] “*Soryu Class AIP submarine*”, *3DExport*, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://es.3dexport.com/3dmodel-soryu-class-aip-submarine-350773.htm> [Acceso: 18-08-2021]

- [79] "How Does Cogeneration Provide Heat and Power?", *Scientific American*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.scientificamerican.com/article/how-does-cogeneration-provide-heat-power/> [Acceso: 18-08-2021]
- [80] "What is Microgeneration? And what is the most cost effective in terms of CO2 reduction", *Claverton-energy.com*, 2008. [En línea]. Disponible en: <https://claverton-energy.com/what-is-microgeneration.html> [Acceso: 18-08-2021]
- [81] Wilson, Alex (2010). *Building Green's Product of the Week: Stirling SunCatcher with "Heat Engine" Technology*. BuildingGreen.
- [82] "Point focus parabolic mirror with Stirling engine", *Wire Web Archive*, 2006. [En línea]. Disponible en: https://web.archive.org/web/20060206085655if_/http://wire0.ises.org:80/wire/independents/imagelibrary.nsf [Acceso: 18-08-2021]
- [83] Cairelli, J.E. "NASA Advanced Refrigerator/Freezer Technology Development Project Overview", en *NASA. 8th International Cryocooler Conference sponsored by the ICC Conference Committee Vail*, Colorado, 1994.
- [84] Berchowicz, David M. "Maximized Performance of Stirling Cycle Refrigerators", en *3rd Annual: IIF-IIR International Congress of Refrigeration*, Oslo, Norway, 1998.
- [85] James, Fales (1996). *Technology Today and Tomorrow*. McGraw-Hill School Pub Co.
- [86] Armentrout, Patricia (1998). *Extreme Machines on Land*. Rourke Pub Group.
- [87] M. A. DeLuchi (1991). *Emissions of Greenhouse Gases from the Use of Transportation Fuels and Electricity*. Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory.
- [88] "4 Stroke Car Engine", *Indiamart*, 2003. [En línea]. Disponible en: <https://www.indiamart.com/proddetail/4-stroke-car-engine-14834734497.html> [Acceso: 18-08-2021]
- [89] Faiz, Asif; Weaver, Christopher S.; Walsh, Michael P. (1996). *Air pollution from motor vehicles: Standards and Technologies for Controlling Emissions*. World Bank Publications.
- [90] "Motor de ciclo Otto de cuatro tiempos", *mozaWeb*, 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.mozaweb.com/es/Extra-Escenas_3D-Motor_de_ciclo_Otto_de_cuatro_tiempos-4020 [Acceso: 18-08-2021]
- [91] "Plans for Stirling Engines", *Plans for Everything*, 2021. [En línea]. Disponible en: http://www.plans-for-everything.com/hen_stirling_engine_plans.html [Acceso: 18-08-2021]

- [92] “Plans for IC Engine Plans”, *Plans for Everything*, 2021. [En línea]. Disponible en: http://www.plans-for-everything.com/hen_ic_engine_plans.html [Acceso: 18-08-2021]
- [93] “Webster Four Stroke Engine”, *Autodesk*, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://gallery.autodesk.com/projects/22523/webster-four-stroke-engine> [Acceso: 18-08-2021]
- [94] “Tap Chart - UNC/UNF Threads”, *Carbide Depot*. [En línea]. Disponible en: <http://www.carbidedepot.com/formulas-tap-standard.htm> [Acceso: 18-08-2021]
- [95] “UNC and UNF - Unified Inch Screw Threads”, *The Engineering Toolbox*, 2011. [En línea]. Disponible en: https://www.engineeringtoolbox.com/unified-screw-threads-unc-unf-d_1809.html [Acceso: 18-08-2021]
- [96] “ANSI External Screw Threads Size & Tolerances Chart”, *Engineers Edge*, 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.engineersedge.com/screw_threads_chart.htm [Acceso: 18-08-2021]
- [97] “Submarino RC HMS Gotland”, *Cults*, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://cults3d.com/es/modelo-3d/juegos/rc-submarine-hms-gotland-1-48> [Acceso: 18-08-2021]

7.2. - Índice de imágenes

IMAGEN 1	2.1: <i>Guillaume Amontons (izda) y diseño de su primer motor de aire caliente (dcha)</i>
IMAGEN 2	2.2: <i>George Caley (izda) y su motor de aire caliente (dcha)</i>
IMAGEN 3	2.3: <i>Robert Stirling (izda) y Planos preliminares del motor Stirling (dcha)</i>
IMAGEN 4	2.4: <i>Motor Philips MP1002CA Stirling</i>
IMAGEN 5	2.5: <i>Submarino clase Gotland</i>
IMAGEN 6	2.6: <i>Motor Stirling de tipo disco solar</i>
IMAGEN 7	2.7: <i>Primeras ilustraciones del uso de pólvora</i>
IMAGEN 8	2.8: <i>Christiaan Huygens (izda) y una ilustración de su motor de pólvora (dcha)</i>
IMAGEN 9	2.9: <i>Denis Papin (izda) y una ilustración de su motor de vapor de agua (dcha)</i>
IMAGEN 10	2.10: <i>Nicéphore Niépce (izda) y su invento, el Pyrèolophore (dcha)</i>
IMAGEN 11	2.11: <i>Samuel Brown (izda) y su motor de vacío (dcha)</i>
IMAGEN 12	2.12: <i>Sadi Carnot</i>
IMAGEN 13	2.13: <i>Motor de William Barnett</i>
IMAGEN 14	2.14: <i>Eugenio Barsanti y Felipe Matteucci (izda) y modelo de su motor conjunto (dcha)</i>
IMAGEN 15	2.15: <i>Jean Joseph Etienne Lenoir (izda) y su motor de combustión interna (dcha)</i>
IMAGEN 16	2.16: <i>Alphonse Beau de Rochas</i>
IMAGEN 17	2.17: <i>Nikolaus Otto</i>
IMAGEN 18	2.18: <i>Motor de combustión interna de cuatro tiempos de Otto</i>
IMAGEN 19	2.19: <i>George Brayton (izda) y James Atkinson (dcha)</i>
IMAGEN 20	2.20: <i>Karl Benz (izda) y su motor de cuatro tiempos (dcha)</i>
IMAGEN 21	2.21: <i>Rudolf Diésel (izda) y su motor de combustión interna (dcha)</i>
IMAGEN 22	3.1: <i>Entorno principal PART</i>
IMAGEN 23	3.2: <i>Entorno principal SKETCH</i>
IMAGEN 24	3.3: <i>Ejemplo de uso de la herramienta Constraint (aplicando longitud sobre línea)</i>
IMAGEN 25	3.4: <i>Figura en Sketch no definida</i>
IMAGEN 26	3.5: <i>Figura en Sketch completamente definida</i>
IMAGEN 27	3.6: <i>Entorno principal PRODUCT</i>
IMAGEN 28	3.7: <i>Interfaz principal de Keyshot</i>
IMAGEN 29	3.8: <i>Opciones de la herramienta de movimiento</i>
IMAGEN 30	4.1: <i>“Base”. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)</i>

IMAGEN 31	4.2: Lower Platform. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)
IMAGEN 32	4.3: Upper Platform. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)
IMAGEN 33	4.4: Platform Pillar. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)
IMAGEN 34	4.5: “Soporte fuente de calor”. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)
IMAGEN 35	4.6: Candle Pillar. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)
IMAGEN 36	4.7: Candle Holder. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)
IMAGEN 37	4.8: “Torre de transmisión”. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)
IMAGEN 38	4.9: Central Pillar. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)
IMAGEN 39	4.10: Tumbler Plate. Resultado CATIA (arriba) y tras renderizado (debajo)
IMAGEN 40	4.11: Long Connection Rod. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)
IMAGEN 41	4.12: Power Piston Connection Rod. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)
IMAGEN 42	4.13: Power piston. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)
IMAGEN 43	4.14: “Volante de inercia”. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)
IMAGEN 44	4.15: Main Shaft Support Pillar. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)
IMAGEN 45	4.16: Main shaft bearing housing. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)
IMAGEN 46	4.17: Flywheel. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)
IMAGEN 47	4.18: Crank. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)
IMAGEN 48	4.19: “Cilindro Principal”. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)
IMAGEN 49	4.20: Main Cylinder. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)
IMAGEN 50	4.21: Power Cylinder. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)
IMAGEN 51	4.22: Test Tube. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)
IMAGEN 52	4.23: Displacer. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)
IMAGEN 53	4.24: Motor Stirling; vista general. Resultado CATIA
IMAGEN 54	4.25: Motor Stirling; vista general. Tras renderizado
IMAGEN 55	4.26: Motor Stirling; vista general (posterior). Tras renderizado
IMAGEN 56	4.26: “Base”. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)
IMAGEN 57	4.27: Base plate. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)
IMAGEN 58	4.28: Side frame. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)
IMAGEN 59	4.29: Crankshaft support. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)
IMAGEN 60	4.30: Main bearing. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)
IMAGEN 61	4.31: Crank Oilier Cup. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)
IMAGEN 62	4.32: “Cilindro principal”. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)
IMAGEN 63	4.33: Cylinder Head Frame. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)

IMAGEN 64	4.34: <i>Cylinder. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)</i>
IMAGEN 65	4.35: <i>Head Gasket. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)</i>
IMAGEN 66	4.36: <i>“Pistón”. Resultados CATIA (dos vistas, arriba) y tras renderizado (debajo)</i>
IMAGEN 67	4.37: <i>Piston. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)</i>
IMAGEN 68	4.38: <i>Connecting Rod. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)</i>
IMAGEN 69	4.39: <i>“Caja de válvulas”. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)</i>
IMAGEN 70	4.40: <i>Valve Block (arriba) y Exhaust / Intake Block (debajo). Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)</i>
IMAGEN 71	4.41: <i>Valve guide. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)</i>
IMAGEN 72	4.42: <i>Valve. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)</i>
IMAGEN 73	4.43: <i>Muelle. Resultado CATIA (arriba) y tras renderizado (debajo)</i>
IMAGEN 74	4.44: <i>Especificaciones de la herramienta Helix</i>
IMAGEN 75	4.45: <i>Venturi. Resultado CATIA (arriba) y tras renderizado (debajo)</i>
IMAGEN 76	4.46: <i>NV Seat. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)</i>
IMAGEN 77	4.47: <i>Needle Valve. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)</i>
IMAGEN 78	4.48: <i>Exhaust Pipe. Resultado CATIA</i>
IMAGEN 79	4.49: <i>Exhaust Pipe. Tras renderizado</i>
IMAGEN 80	4.50: <i>“Conjunto de ruedas y engranajes”. Resultado CATIA (arriba) y tras renderizado (abajo)</i>
IMAGEN 81	4.51: <i>Crankshaft. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)</i>
IMAGEN 82	4.52: <i>Flywheel. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)</i>
IMAGEN 83	4.53: <i>Engranajes; pequeño (arriba), grande (abajo). Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)</i>
IMAGEN 84	4.54: <i>Conexión entre engranajes.</i>
IMAGEN 85	4.55: <i>Desgranado de las características y parámetros del engranaje</i>
IMAGEN 86	4.56: <i>Exhaust Cam. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)</i>
IMAGEN 87	4.57: <i>Rocker arm. Resultado CATIA (arriba) y tras renderizado (debajo)</i>
IMAGEN 88	4.58: <i>Rocker arm spring. Resultado CATIA (izda) y tras renderizado (dcha)</i>
IMAGEN 89	4.59: <i>Motor Webster; vista general. Resultado CATIA</i>
IMAGEN 90	4.60: <i>Motor Webster; vista general. Tras renderizado</i>
IMAGEN 91	4.61: <i>Motor Webster; vista posterior. Resultado CATIA</i>
IMAGEN 92	4.62: <i>Motor Webster; vista posterior. Tras renderizado</i>
IMAGEN 93	4.63: <i>Motor Webster; vista lateral. Resultado CATIA</i>
IMAGEN 94	4.64: <i>Motor Webster; vista lateral. Tras renderizado</i>
IMAGEN 95	5.1: <i>Motor Stirling tipo beta</i>
IMAGEN 96	5.2: <i>Ciclo de funcionamiento del motor Stirling de tipo beta</i>

IMAGEN 97	<i>5.3: Motor Stirling estudiado en el presente Trabajo</i>
IMAGEN 98	<i>5.4: Ciclo Stirling</i>
IMAGEN 99	<i>5.5: Esquema básico de un motor de combustión interna de cuatro tiempos</i>
IMAGEN 100	<i>5.6: Ciclo de funcionamiento de un motor de combustión interna de cuatro tiempos</i>
IMAGEN 101	<i>5.7: Motor de combustión interna de cuatro tiempos estudiado en este Trabajo (motor Webster)</i>
IMAGEN 102	<i>5.8: Ciclo Otto</i>
IMAGEN 103	<i>6.1: Submarino clase Söryü</i>
IMAGEN 104	<i>6.2: Motor Stirling solar en la Plataforma Solar de Almería (España)</i>
IMAGEN 105	<i>6.3: Global Cooling Stirling Cooler expuesto en la universidad de Ohio</i>
IMAGEN 106	<i>6.4: Motor de combustión interna de cuatro tiempos adaptado para automóvil</i>
IMAGEN 107	<i>6.5: Disposición interna del motor y transmisiones dentro de un automóvil</i>

7.3. - Planos

En el siguiente anexo se mostrarán los planos seguidos para el modelado de ambos motores.

Las referencias para la obtención de estos planos se muestran de forma correspondiente en la bibliografía.

7.3.1. - MOTOR STIRLING

La referencia para estos planos puede encontrarse en la bibliografía; ver [91].

7.3.2. - MOTOR WEBSTER

La referencia para estos planos puede encontrarse en la bibliografía; ver [92].