

Proyecto Fin de Grado

Ingeniería Aeroespacial

Modelado y Animación de motor Simpson and Shipton en CATIA V5

Autor: Julien Pardo Gómez

Tutor: Juan Martínez Palacios

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

Sevilla, 2021



Departamento de
Ingeniería Gráfica ETSI

Proyecto Fin de Grado
Ingeniería Aeroespacial

Modelado y Animación de motor Simpson and Shipton en CATIA V5

Autor:

Julien Pardo Gomez

Tutor:

Juan Martínez Palacios

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

Sevilla, 2021

Proyecto Fin de Grado: Modelado y Animación de motor Simpson and Shipton en CATIA V5

Autor: Julien Pardo Gomez

Tutor: Juan Martínez Palacios

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2021

El Secretario del Tribunal

Resumen

El objetivo de este proyecto de fin de grado es el modelado y animación de un motor de vapor de carrera corta patentado por los ingenieros Joseph Simpson y James Alfred Shipton mediante un programa informático de diseño, fabricación e ingeniería asistido por computador, CATIA, en concreto CATIA V5r19. Para ello, se inicia el proyecto con un análisis del contexto histórico, entendiendo la situación y los motivos de la época que llevaron a la aparición de este motor en la escena industrial. Posteriormente, se lleva a cabo una búsqueda de información relativa al funcionamiento, piezas y al autor de los planos que se utilizan para el modelado de la máquina objeto del proyecto. Por último y a forma de concluir el prólogo, se realiza una breve introducción a los software CAD (computer-aided design) y específicamente a CATIA y a su historia.

Una vez establecida la base del proyecto y concluida la búsqueda de información correspondiente, se pasa al modelado de cada una de las piezas que conforman el motor y a su ensamblaje en subgrupos, para finalmente ensamblar estos subconjuntos entre ellos obteniendo la máquina completa. Tras cumplir el primer objetivo de este proyecto, el modelado, en el capítulo 7 se expone el método empleado para alcanzar el segundo y último propósito de proyecto, la caracterización del movimiento y funcionamiento de las distintas partes del motor.

Para finalizar el proyecto, se reflexiona sobre las decisiones tomadas y las dificultades encontradas a lo largo del mismo, acompañando estas conclusiones con posibles desarrollos futuros con el fin de hacer más completo el presente trabajo.

Abstract

The aim of this final degree project is the modelling and animation of a short stroke steam engine patented by engineers Joseph Simpson and James Alfred Shipton using a computer-aided design, manufacturing and engineering software, CATIA, specifically CATIA V5r19. The project begins with an analysis of the historical context, understanding the situation and the reasons of the period that led to the appearance of this engine on the industrial scene. Later, a search is carried out for information related to the operation, parts and the author of the drawings used for the modeling of the machine. Finally, and as a way to conclude the prologue, a brief introduction is made to CAD (computer-aided design) software and specifically to CATIA and its history.

Once the project base has been established and the search for the corresponding information has concluded, the modeling of each of the parts that shape the engine and their assembly into subgroups is carried out to finally assemble these subsets between them, obtaining the complete machine. After fulfilling the first objective of this project, the modeling, Chapter 7 describes the method used to achieve the second and last project purpose, the characterization of the movement and operation of t

he different parts of the engine.

To finalize the project, a reflexion is made on the decisions taken and the difficulties found throughout it, accompanying these conclusions with possible future developments in order to make this work more complete.

Índice

Resumen	vii
Abstract	ix
Índice	x
Índice de Tablas	xiii
Índice de ilustraciones	xiv
1 Introducción	1
1.1 <i>Objetivo y motivación</i>	1
1.2 <i>Estructura y metodología</i>	1
2 Contexto Histórico	3
2.1 <i>Eolípila</i>	3
2.2 <i>La Revolución Industrial</i>	4
2.3 <i>Máquinas de vapor en la industria</i>	4
2.4 <i>La Gran Exposición de 1851</i>	7
3 Objeto de Estudio	9
3.1 <i>Partes y funcionamiento</i>	10
3.2 <i>Lista de piezas</i>	11
3.2.1 Estructura	11
3.2.2 Cilindro, pistón y volante de inercia	12
3.2.3 Bielas, manivelas y espaciadores	12
3.2.4 Válvula y bloque de suministro	13
3.2.5 Tornillos, tuercas, arandelas y pasadores	13
4 CATIA V5r19	15
4.1 <i>Historia</i>	15
5 Modelado	17
5.1 <i>Módulos y herramientas</i>	17
5.1.1  Sketch	17
5.1.2  Pad	20
5.1.3  Multi-Pad	21
5.1.4  Pocket	22
5.1.5  Shaft	22
5.1.6  Groove	23
5.1.7  Hole	23
5.1.8  Rib	25
5.1.9  Slot	26

5.1.10		Edge Fillet	26
5.1.11		Chamfer	27
5.1.12		Thread	28
5.1.13		Pattern	28
5.1.14		Helix	30
5.2		<i>Piezas</i>	30
5.2.1		Estructura	30
5.2.2		Cilindro, pistón y volante de inercia	39
5.2.3		Válvula y bloque de suministro	45
5.2.4		Bielas, manivelas y espaciadores	53
5.2.5		Tornillos, tuercas y pasadores	65
6		Ensamblado	67
6.1		<i>Módulo y herramientas</i>	67
6.1.1		Existing Component	67
6.1.2		Fix Component	67
6.1.3		Coincidence Constraint	68
6.1.4		Contact Constraint	68
6.1.5		Offset Constraint	68
6.1.6		Angle Constraint	68
6.1.7		Manipulation	69
6.2		<i>Subconjuntos</i>	69
6.2.1		Columnas	69
6.2.2		Soporte de rodamientos	70
6.2.3		Cilindro	70
6.2.4		Pistón	71
6.2.5		Válvula y mecanismo	71
6.2.6		Volante de inercia	73
6.2.7		Bloque de suministro y válvula de parada	73
6.2.8		Cigüeñal	74
6.2.9		Biela excéntrica	74
6.3		<i>Ensamblado final</i>	75
7		Animación	83
7.1		<i>Módulo y herramientas</i>	83
7.1.1		Fixed Part	83
7.1.2		Revolute Joint	83
7.1.3		Prismatic Joint	83
7.1.4		Rigid Joint	84
7.1.5		Point Curve Joint	84
7.1.6		Slide Curve Joint	85

7.1.7	 Mechanism Analysis	85
7.1.8	 Simulation	85
7.2	<i>Vínculos</i>	86
7.2.1	Volante de inercia	86
7.2.2	Cigüeñal	86
7.2.3	Bielas	87
7.2.4	Válvula	87
7.2.5	Pistón	89
7.2.6	Espaciadores	90
8	Conclusión y Desarrollos futuros	91
	Referencias	93
	A Anexo	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Versiones de Software CATIA	16
Tabla 2 Métricas tornillos	99
Tabla 3 Métricas tuercas	100
Tabla 4 Métricas tuercas abovedadas	101
Tabla 5 Métricas arandelas	102
Tabla 6 Métricas pasadores	103
Tabla 7 Métricas espárragos	104

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2.1-1 Eolípila [3]	3
Ilustración 2.3-1 Thomas Newcomen 1663-1729 [5]	4
Ilustración 2.3-2 Máquina de Newcomen [6]	5
Ilustración 2.3-3 James Watt [7]	6
Ilustración 2.3-4 Comparativa de máquinas, derecha con depósitos aislados [8]	6
Ilustración 2.4-2.3-1 Crystal Palace, sede de la Gran Exposición de 1851 [10]	7
Ilustración 2.4-2 Portada del catálogo oficial de la Gran Exposición de 1851 [11]	7
Ilustración 2.4-3 Fragmento del listado de máquinas de la Gran Exposición de 1851 [11]	8
Ilustración 3.1-1 Vista frontal, sección transversal central[14]	10
Ilustración 3.1-2 Vista lateral, sección longitudinal central[14]	10
Ilustración 3.1-3 Movimiento conjunto bielas-manivelas y cilindro-excéntrica[15]	11
Ilustración 5.1-1 Ejemplo <i>Sketch</i>	17
Ilustración 5.1-2 <i>Constraints Defined in Dialog Box</i>	18
Ilustración 5.1-3 Desplegable de la herramienta <i>Rectangle</i>	19
Ilustración 5.1-4 Desplegable de la herramienta <i>Circle</i>	19
Ilustración 5.1-5 Desplegable <i>Trim</i>	19
Ilustración 5.1-6 Desplegable <i>Mirror</i>	20
Ilustración 5.1-7 Ventana de propiedades extendidas <i>Pad</i>	20
Ilustración 5.1-8 <i>Pad</i> a una circunferencia empleando la opción <i>Mirrored extent</i>	21
Ilustración 5.1-9 Ventana de propiedades extendidas <i>Multi-Pad</i>	21
Ilustración 5.1-10 <i>Multi-Pads</i> con límites distintos a un mismo <i>Sketch</i>	21
Ilustración 5.1-11 Ventana de propiedades extendidas <i>Pocket</i>	22
Ilustración 5.1-12 Ventana de propiedades extendidas <i>Shaft</i>	22
Ilustración 5.1-13 <i>Shaft</i> con espesor	23
Ilustración 5.1-14 Ventana de propiedades extendidas <i>Groove</i>	23
Ilustración 5.1-15 Ventana de propiedades <i>Hole, Extension</i>	24
Ilustración 5.1-16 Ventana de propiedades <i>Hole, Type</i>	24
Ilustración 5.1-17 Ventana de propiedades <i>Hole, Thread Definition</i>	25
Ilustración 5.1-18 Ventana de propiedades <i>Rib</i>	25
Ilustración 5.1-19 Ventana de propiedades <i>Slot</i>	26
Ilustración 5.1-20 Ventana de propiedades extendidas <i>Edge Fillet</i>	26
Ilustración 5.1-21 <i>Edge Fillet</i> interior y exterior	27
Ilustración 5.1-22 Ventana de propiedades <i>Chamfer</i>	27
Ilustración 5.1-23 <i>Chamfer</i> , modo dos longitudes	27
Ilustración 5.1-24 Ventana de propiedades <i>Thread</i>	28

Ilustración 5.1-25 Desplegable <i>Pattern</i>	28
Ilustración 5.1-26 Ventana de propiedades <i>Rectangular Pattern</i>	29
Ilustración 5.1-27 Ventana de propiedades <i>Circle Pattern</i>	29
Ilustración 5.1-28 Ventana de propiedades <i>User Pattern</i>	30
Ilustración 5.1-29 Ventana de propiedades <i>Helix</i>	30
Ilustración 5.2-1 Plano, base de madera	31
Ilustración 5.2-2 Pieza, base de madera	31
Ilustración 5.2-3 Plano, placa base para columna	32
Ilustración 5.2-4 Pieza, placa base para columna	32
Ilustración 5.2-5 Plano, disco para columna	32
Ilustración 5.2-6 Pieza, disco para columna	33
Ilustración 5.2-7 Plano, columna	33
Ilustración 5.2-8 Plano, placa de soporte intermedia	34
Ilustración 5.2-9, Pieza, placa de soporte intermedia	34
Ilustración 5.2-10 Plano y pieza, poste para barandilla	35
Ilustración 5.2-11 Plano y pieza, poste de esquina para barandilla	35
Ilustración 5.2-12 Plano y pieza, barandilla corta	36
Ilustración 5.2-13 Plano y pieza, barandilla larga	36
Ilustración 5.2-14 Plano y pieza, base para soporte de rodamiento	36
Ilustración 5.2-15 Plano y pieza, soporte inferior de rodamiento	37
Ilustración 5.2-16 Plano y pieza, soporte superior de rodamiento	37
Ilustración 5.2-17 Plano y pieza, rodamiento	38
Ilustración 5.2-18 Plano, placa de soporte para cilindro	38
Ilustración 5.2-19 Pieza, placa de soporte para cilindro	39
Ilustración 5.2-20 Separación en partes del cilindro	39
Ilustración 5.2-21 Plano, cilindro	40
Ilustración 5.2-22 Plano, sección central cilindro	40
Ilustración 5.2-23 Pieza, cilindro	41
Ilustración 5.2-24 Plano y pieza, tapa frontal del cilindro	41
Ilustración 5.2-25 Plano, tapa lateral del cilindro	42
Ilustración 5.2-26 Plano y pieza, engrasador	42
Ilustración 5.2-27 Plano y pieza, tapa del engrasador	43
Ilustración 5.2-28 Plano y pieza, volante de inercia	43
Ilustración 5.2-29 Plano, pistón	44
Ilustración 5.2-30 Pieza, pistón	44
Ilustración 5.2-31 Plano y pieza, anillo sellador del pistón	44
Ilustración 5.2-32 Plano, eje del pistón	45
Ilustración 5.2-33 Pieza, eje del pistón	45
Ilustración 5.2-34 Plano, cuerpo de la válvula	46

Ilustración 5.2-35 Pieza, cuerpo de la válvula	46
Ilustración 5.2-36 Plano y pieza, adaptador cuerpo-pasador válvula	47
Ilustración 5.2-37 Plano y pieza, guía del vástago de la válvula	47
Ilustración 5.2-38 Plano y pieza, aro sellador de la guía de la válvula	48
Ilustración 5.2-39 Plano y pieza, émbolo de la válvula	48
Ilustración 5.2-40 Plano y pieza, tapón del cuerpo de la válvula	48
Ilustración 5.2-41 Plano y pieza, cuerpo de válvula de parada	49
Ilustración 5.2-42 Plano y pieza, tapa superior de válvula de parada	49
Ilustración 5.2-43 Plano y pieza, husillo de la válvula de parada	50
Ilustración 5.2-44 Plano y pieza, tornillo espaciador del husillo	50
Ilustración 5.2-45 Plano y pieza, sellador de la válvula de parada	51
Ilustración 5.2-46 Plano y pieza, tuerca del husillo de la válvula de parada	51
Ilustración 5.2-47 Plano y pieza, rueda manual de la válvula de parada	51
Ilustración 5.2-48 Tubo de suministro de vapor	52
Ilustración 5.2-49 Plano y pieza, bloque conector de suministro de vapor	52
Ilustración 5.2-50 Plano, extremo del cigüeñal del volante de inercia	53
Ilustración 5.2-51 Pieza, extremo del cigüeñal del volante de inercia	53
Ilustración 5.2-52 Plano y pieza, manivela del extremo delantero del cigüeñal	54
Ilustración 5.2-53 Plano y pieza, manivela del extremo del cigüeñal del volante de inercia	54
Ilustración 5.2-54 Plano y pieza, manivela del extremo del eje del pistón	54
Ilustración 5.2-55 Plano, extremo delantero del cigüeñal	55
Ilustración 5.2-56 Pieza, extremo delantero del cigüeñal	55
Ilustración 5.2-57 Plano, biela interior	56
Ilustración 5.2-58 Pieza, biela interior	56
Ilustración 5.2-59 Plano y pieza, espaciador pistón-biela interior	56
Ilustración 5.2-60 Plano, biela exterior	57
Ilustración 5.2-61 Pieza, biela exterior	57
Ilustración 5.2-62 Plano y pieza, espaciador manivela-biela pistón	57
Ilustración 5.2-63 Plano y pieza, espaciador del cigüeñal	58
Ilustración 5.2-64 Plano y pieza, anillo retenedor de biela	58
Ilustración 5.2-65 Plano y pieza, manivela de unión volante de inercia-cigüeñal	59
Ilustración 5.2-66 Plano, soporte de manivela de la válvula	59
Ilustración 5.2-67 Pieza, soporte de manivela de la válvula	59
Ilustración 5.2-68 Plano, eje de la manivela de la válvula	60
Ilustración 5.2-69 Pieza, eje de la manivela de la válvula	60
Ilustración 5.2-70 Plano y pieza, brazo central de biela de la válvula	60
Ilustración 5.2-71 Plano y pieza, brazo exterior de biela de la válvula	61
Ilustración 5.2-72 Plano y pieza, biela lateral de la válvula	61
Ilustración 5.2-73 Plano y pieza, vástago de la válvula	62
Ilustración 5.2-74 Plano, vigueta cruzada para bielas de la válvula	62

Ilustración 5.2-75 Pieza, vigueta cruzada para bielas de la válvula	63
Ilustración 5.2-76 Plano, polea excéntrica	63
Ilustración 5.2-77 Pieza, polea excéntrica	63
Ilustración 5.2-78 Plano, biela excéntrica	64
Ilustración 5.2-79 Pieza, biela excéntrica	64
Ilustración 5.2-80 Tornillo, tornillo C-Sunk, tornillo ciego y espárrago	65
Ilustración 5.2-81 Tuerca y tuerca abovedada	65
Ilustración 5.2-82 Arandela	65
Ilustración 5.2-83 Pasador	65
Ilustración 6.1-1 Ventana emergente de la herramienta <i>Existing Component</i>	67
Ilustración 6.1-2 Ventana de propiedades <i>Offset Constraint</i>	68
Ilustración 6.1-3 Ventana de propiedades <i>Angle Constraint</i>	69
Ilustración 6.1-4 Herramienta <i>Manipulation</i>	69
Ilustración 6.2-1 Componentes de las columnas	70
Ilustración 6.2-2 Componentes de rodamientos	70
Ilustración 6.2-3 Componentes del cilindro	71
Ilustración 6.2-4 Componentes del pistón	71
Ilustración 6.2-5 Componentes de la válvula	72
Ilustración 6.2-6 Componentes del mecanismo de actuación de la válvula	72
Ilustración 6.2-7 Componentes del volante de inercia	73
Ilustración 6.2-8 Componentes de la válvula de parada y bloque de suministro de vapor	73
Ilustración 6.2-9 Componentes del cigüeñal	74
Ilustración 6.2-10 Componentes de la biela excéntrica	74
Ilustración 6.3-1 Montaje del bloque de suministro y válvula	75
Ilustración 6.3-2 Montaje del cilindro	76
Ilustración 6.3-3 Montaje de placa de soporte del cilindro	76
Ilustración 6.3-4 Montaje de placa intermedia y rodamientos	77
Ilustración 6.3-5 Montaje de base de madera	77
Ilustración 6.3-6 Montaje de componentes móviles	78
Ilustración 6.3-7 Zoom, montaje de componentes móviles	79
Ilustración 6.3-8 Icono de Photo Studio Easy Tools	79
Ilustración 6.3-9 Herramienta Photo Studio Easy Tools	79
Ilustración 6.3-10 Vista isométrica 1 del motor	80
Ilustración 6.3-11 Vista isométrica 2 del motor	80
Ilustración 6.3-12 Vistas laterales y en planta del motor	81
Ilustración 7.1-1 Ventana de propiedades <i>Revolute Joint</i>	83
Ilustración 7.1-2 Ventana de propiedades <i>Prismatic Joint</i>	84
Ilustración 7.1-3 Ventana de propiedades <i>Rigid Joint</i>	84
Ilustración 7.1-4 Ventana de propiedades <i>Point Curve Joint</i>	84

Ilustración 7.1-5 Ventana de propiedades <i>Slide Curve Joint</i>	85
Ilustración 7.1-6 Herramienta <i>Mechanism Analysis</i>	85
Ilustración 7.1-7 Desplegable <i>Simulation</i>	86
Ilustración 7.2-1 Vínculo del volante de inercia-cigüeñal	86
Ilustración 7.2-2 Vínculos sobre cigüeñal-excéntrica-manivela de la válvula	87
Ilustración 7.2-3 Vínculo de manivela de la válvula	87
Ilustración 7.2-4 <i>Point Curve Joint</i> , Punto y línea empleados	88
Ilustración 7.2-5 Vínculo sobre el vástago central	88
Ilustración 7.2-6 Comparativa del modelo con la literatura [13, pp. 152, fig-131]	89
Ilustración 7.2-7 Vínculos sobre el pistón	90

1 INTRODUCCIÓN

Antes de iniciar el desarrollo del proyecto se exponen los motivos que han llevado a su realización, los objetivos que se pretenden alcanzar, así como la metodología y la estructura seguida en la redacción de esta memoria técnica.

1.1 Objetivo y motivación

La finalidad de este trabajo de fin de grado es el estudio, modelado y animación de un motor de vapor alternativo de carrera corta mediante el programa de diseño asistido por computador CATIA V5r19.

Mediante el acometimiento de este proyecto se pretende ampliar los conocimientos en el entorno de programas de diseño 3D, siendo la experiencia en este tipo de software un requisito imprescindible en sectores de interés como son los de diseño, cálculo estructural y cálculo aerodinámico, ya sea en el ámbito aeronáutico o automovilístico.

1.2 Estructura y metodología

En cuanto a la planificación y estructura del proyecto, este se inicia con una búsqueda de información acerca de este tipo de motores, sus creadores y su historia, investigando también el fabricante del modelo de motor en cuestión, Stewart Hart[1], cuyos planos son los que se emplean para el modelaje de las piezas y su ensamblaje. Para esta etapa, se emplea los archivos disponible en la biblioteca de la escuela de la Universidad de Sevilla, así como fuentes encontradas mediante el buscador “Google Académico” y las bases de datos proporcionados por el ministerio de ciencia e innovación, WOS y SCOPUS.

Tras esta primera fase, obligatoria y esencial para comprender el funcionamiento del motor, se pasa a la descripción y modelaje de las piezas que conforman la máquina mediante las herramientas disponibles en el módulo de *Part Design*. Una vez modeladas las piezas, se procede al ensamblaje de las mismas, obteniendo en primera instancia subconjuntos y uniendo posteriormente unos con otros hasta obtener el motor completo. Para el ensamblaje se emplea el módulo de CATIA *Assembly Design*. Por último, se caracteriza el movimiento del motor a través del módulo *DMU Kinematics*. Con respecto a la estructura de estos capítulos, todos ellos se inician con el desarrollo de las herramientas usadas, siguiendo con la descripción del proceso seguido en CATIA para cada caso.

Finalmente y concluyendo el proyecto, se realiza un análisis de los resultados así como una exposición de posibles desarrollos futuros con el objetivo de profundizar este trabajo de fin de grado.

2 CONTEXTO HISTÓRICO

Antes de pasar a estudiar y describir el objeto de este proyecto, el motor de vapor de carrera corta de los ingenieros Joseph Simpson y James Alfred Shipton, se hace necesario contextualizar y situar temporalmente su invención en la historia.

Este motor apareció en la escena tecnológica en el año 1851 [2], coincidiendo, aproximadamente, con el fin de la primera Revolución Industrial.

Por tanto, para poner en contexto este proyecto se parte de la primera máquina de vapor conocida por la humanidad, la Eolípila de Herón del siglo I [3], pasando por la invención de la máquina de vapor de James Watt, durante la Revolución Industrial, considerada la base de las máquinas de vapor, hasta llegar a la gran exposición de 1851, evento en el cuál se da a conocer por primera vez el motor objeto de este proyecto.

2.1 Eolípila

Considerada como la primera máquina de vapor o térmica de la historia, fue inventada por el ingeniero y matemático helenístico Herón de Alejandría. Consiste en una caldera, de la que salen dos tubos huecos conectados a una esfera hueca de tal forma que se permite el movimiento de rotación de la esfera respecto al eje horizontal. A su vez, de la esfera salen otros dos tubos huecos en un plano perpendicular al eje de giro.



Ilustración 2.1-1 Eolípila [3]

La caldera, que estaba fabricada con un material resistente al fuego se situaba encima de una fuente de calor, el agua en su interior se calentaba hasta producir vapor que ascendía por los tubos hasta llegar a la esfera, saliendo por los tubos convenientemente curvados, produciendo el giro de la esfera.

2.2 La Revolución Industrial

... for the first time in history, the living standards of the masses of ordinary people have begun to undergo sustained growth (...) Nothing remotely like this economic behaviour is mentioned by the classical economists, even as a theoretical possibility ...- Robert E. Lucas-

El inicio de la Revolución industrial se sitúa en la Gran Bretaña de la segunda mitad del siglo XVIII, aunque posteriormente fue expandiéndose de forma desigualada a otros países. Este proceso supuso un antes y un después en la historia, al transformar una economía basada en la agricultura y el comercio en una economía industrializada y mecanizada.

El término revolución industrial suele referirse al complejo de innovaciones tecnológicas que, al sustituir la habilidad humana por la maquinaria y la fuerza humana y animal por energía mecánica, provoca el paso desde la producción artesana a la fabril, dando así lugar al nacimiento de la economía moderna.- Landes, D. S.[4]-

Durante la Primera Revolución Industrial se producen los mayores avances en todos los ámbitos de la vida, sociales, económicos y tecnológicos desde la prehistoria, la renta per capitat, tras siglos sin variaciones apreciables, se multiplica a la vez que lo hace la industria y la producción agrícola.

En este contexto de cambios tecnológicos, en el que las invenciones se suceden, destaca un avance que permitió sustituir la rueda hidráulica de la época, desempeñando un papel fundamental en la explotación de energía térmica, la máquina de vapor.

2.3 Máquinas de vapor en la industria

Durante la Revolución Industrial se produce un proceso de retroalimentación entre las máquinas y la energía necesaria para su funcionamiento. A medida que las máquinas reemplazan al trabajo humano y animal, el consumo de carbón aumenta de forma drástica, cubriendo el crecimiento exponencial de energía necesaria para la industria, de tal forma que en el año 1870, la producción anual de carbón en Inglaterra era del orden de 100.000.000 toneladas.

Gracias a los avances tecnológicos del siglo XVIII, este incremento constante de demanda de energía se cubrió llevando las explotaciones mineras de carbón a mayores profundidades, originando frecuentemente inundaciones en las excavaciones. La primera máquina de vapor que surge para solucionar este contratiempo, capaz de bombear el agua de las minas y permitiendo, por tanto, extraer el carbón de las zonas más profundas, fue una invención del herrero Thomas Newcomen en el año 1712.[4]



Ilustración 2.3-1 Thomas Newcomen 1663-1729 [5]

La máquina de Thomas Newcomen, ver ilustración 2-3, consiste en un cilindro con tres aperturas, una inferior, conectada mediante una válvula de paso a una caldera, una lateral, también conectada por una válvula a un depósito de agua fría, y la apertura superior, en relación directa con la atmósfera, de ahí a que estas máquinas recibieran el nombre de atmosféricas.

En este cilindro se introduce un pistón que sube al entrar vapor de agua, una vez el cilindro lleno, se cierra la válvula inferior y se abre la del depósito de agua fría, el vapor que se encuentra en el cilindro se condensa creando un vacío respecto al exterior, y provoca, por tanto, la bajada del pistón. El pistón a su vez está conectado a un balancín en uno de sus extremos mientras que en el otro se encuentra una barra con un contrapeso que desciende directamente hasta la bomba mecánica.

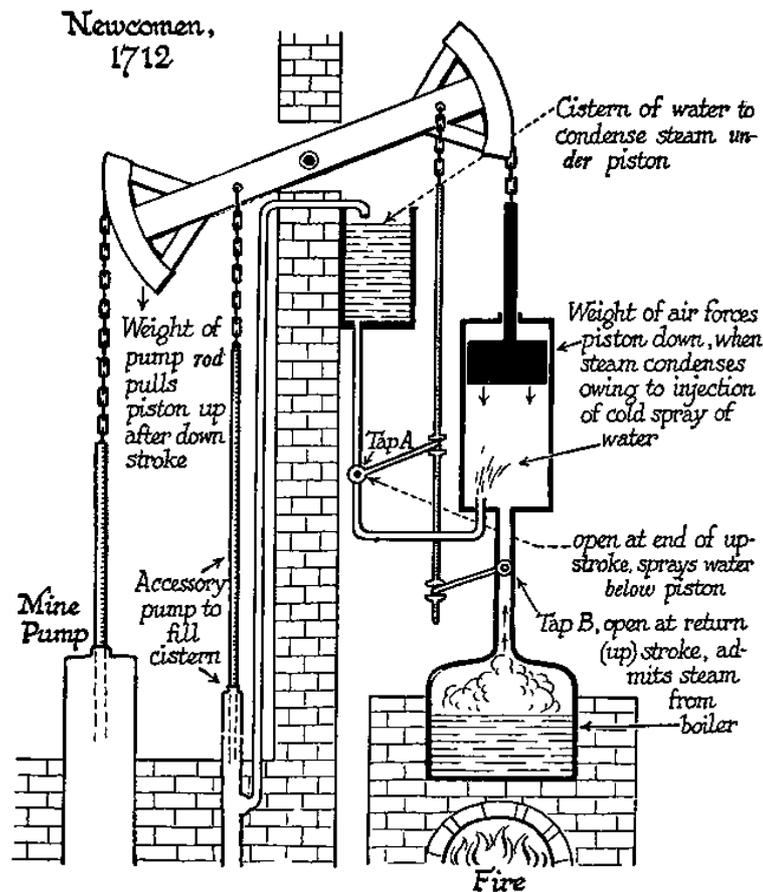


Ilustración 2.3-2 Máquina de Newcomen [6]

Gracias a esta máquina, el carbón no escaseó en la industria inglesa. Sin embargo, su eficiencia era bastante baja y su funcionamiento irregular, por lo que quedó obsoleta en el año 1769 tras la salida al mercado de la patente de James Watt.

La invención de la nueva máquina del escocés Watt se inicia en el año 1763, cuando al reparar una máquina de Newcomen se percató de la ineficiencia del proceso de calentamiento y enfriamiento del cilindro.

En el año 1778 funcionaban en Cornwall un total de 70 máquinas de Newcomen, y en 1790 todas habían desaparecido menos una, siendo sustituidas por máquinas de vapor de Watt. En las Consolidated Mines de Cornwall el gasto de carbón se redujo de alrededor de 19.000 hasta las 6.100 toneladas al año. Esto constituyó un ahorro anual de 10.830 libras esterlinas al precio corriente de carbón.[4]

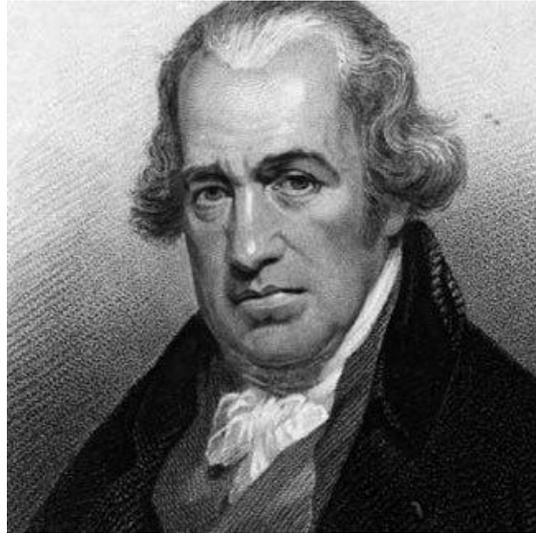


Ilustración 2.3-3 James Watt [7]

Para mejorar el proceso termodinámico, J. Watt separa el proceso de expansión y el de condensación, realizándose estos en dos depósitos diferentes. De esta forma, una vez el vapor se expande en un cilindro aislado para minimizar pérdidas de calor, pasa a un condensador refrigerado permanentemente con agua. Además, los gases sobrantes en el condensador se extraen mediante un mecanismo, las partes móviles se lubrican con aceites o grasas y por último se transforma el mecanismo de transmisión del movimiento. [6]

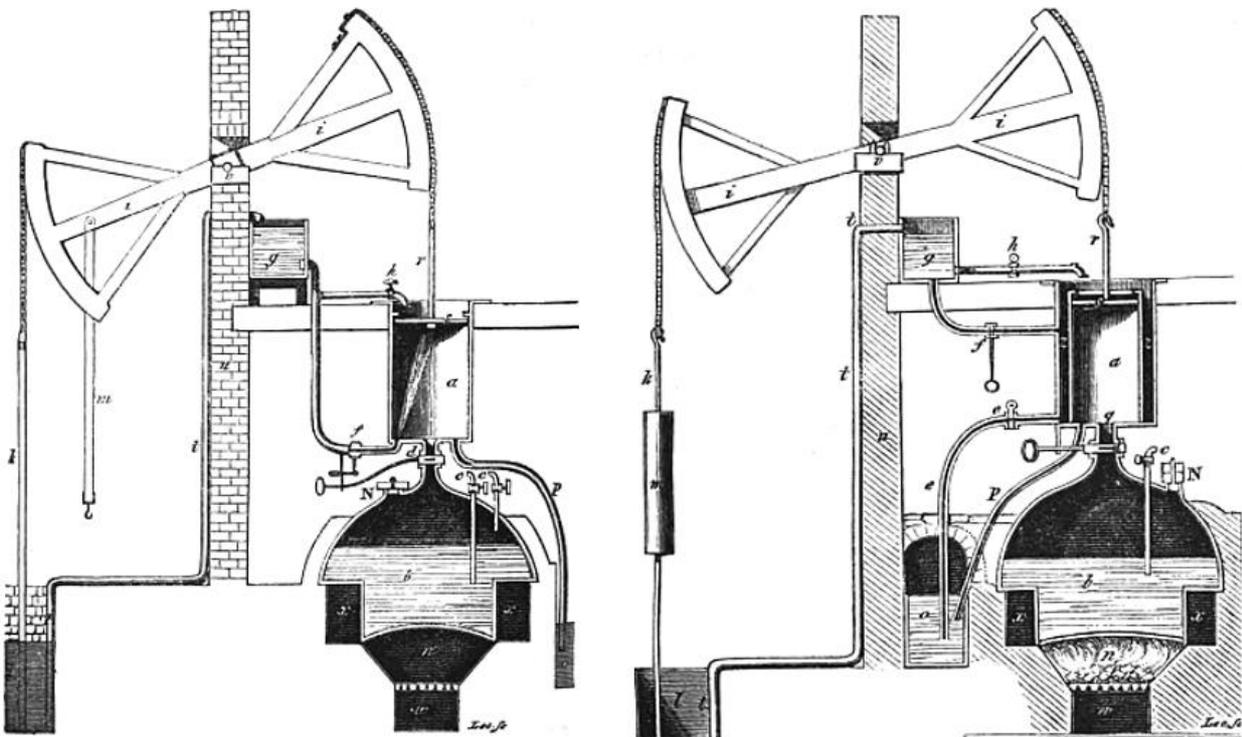


Ilustración 2.3-4 Comparativa de máquinas, derecha con depósitos aislados [8]

Posteriormente, el propio James Watt y otros inventores de la época continuarían modificando esta máquina, adaptándola a otros usos además del bombeo, convirtiéndose en la base de la revolución del transporte en ferrocarriles y barcos de vapor. [9]

2.4 La Gran Exposición de 1851



Ilustración 2.4-2.3-1 Crystal Palace, sede de la Gran Exposición de 1851 [10]

El 1 de mayo de 1851 se inicia la celebración de la primera exposición universal en Londres[10], con un total de 28 países participantes procedentes de América, Asia, África y Europa. El principal motivo de este evento, al que acudieron más de seis millones de visitantes, era el mostrar al mundo los avances tecnológicos de cada país, quedando Reino Unido, como no podía ser de otra forma por la Primera Revolución Industrial, como el país más desarrollado industrialmente del mundo. Tal era la diferencia que más de la mitad de la superficie del edificio de la Gran Exposición, el Crystal Palace, estaba ocupado por Reino Unido para exponer sus maquinarias, materiales o productos en general. Esto puede comprobarse en el catálogo oficial de la Gran Exposición de los trabajos de la industria de todas las naciones de 1851[11], en el que aparecen recogidos todos los detalles del evento, desde las normas, planos, comisiones, países participantes, incluyendo todos los artículos de la exposición.

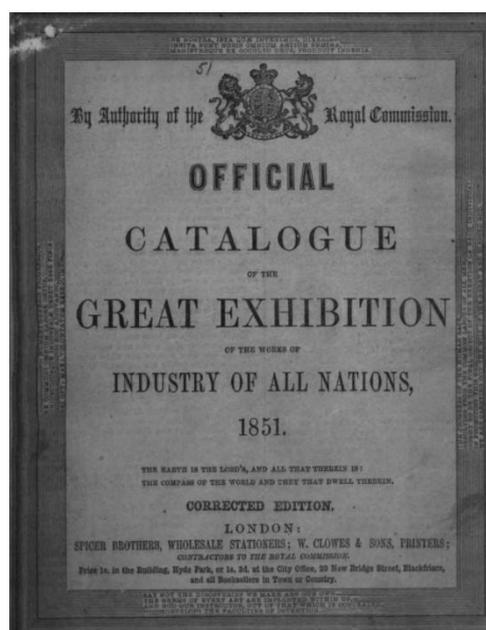


Ilustración 2.4-2 Portada del catálogo oficial de la Gran Exposición de 1851 [11]

Siguiendo con el catálogo [11], en la categoría 5 de la sección 2, correspondiente a máquinas de uso directo, incluyendo mecanismo marítimo, de ferrocarril o de carruaje, concretamente en la página 34 del mismo, se encuentra finalmente el motor alternativo(14) de los mancurianos J.Simpson y J.A.Shipton junto a otras máquinas como por ejemplo un motor para uso marítimo del propio James Watt de 700 caballos de potencia(6).

SECTION II.—MACHINERY.

Class 5. MACHINES FOR DIRECT USE, INCLUDING CARRIAGES, RAILWAY AND MARINE MECHANISM.

— Areas A. B. 10 to 30; C. D. E. 1 to 30; F. 1 to 32; G. H. 1 to 13, & 19 to 25. —

- 1 **ATHERTON, C.** Dockyard, Devonport, Inv.—Pair of marine steam-engines of 25-horse power, planned with a view to apply the sway-beam principle of construction to driving the submerged screw propeller.
- 2 **POWELL, E. J.** 11 Hartland Ter. Camden Town, Des.—Drawings of the various forms of patent screw propellers.
- 3 **SMITH, Captain.**—Three screw propellers.
- 4 **STOTHERT, SLAUGHTER, & Co.** Bristol, Inv. and Manu.—Marine engine, intended to meet the assumed requirements of machinery for propulsion by screw, in which it is imperative to drive the propeller shaft at a speed unsuited to the speed of the vacuum apparatus.
- 5 **TAPLIN, R.** 7 Upper Woodland Ter. Woolwich, Inv.—Model of a telescope funnel or chimney for marine boilers.
- 6 **WATT, JAMES, & Co.** 18 London St. London, and Soho, Birmingham, Des. and Manu.—Marine-engines, of the collective power of 700 horses, designed for driving the screw propeller by direct action. Models made in 1785, showing the early application of steam power to locomotion, &c.
- 8 **PENN & SON, Greenwich, Manu.**—Pair of marine oscillating engines, and of patent marine engines on the trunk principle, for the driving of screw-propellers direct. Working models of marine oscillating engines, and of patent trunk engines. An auxiliary or “donkey” engine.
- 10 **FOSSICK & HACKWORTH, Stockton-on-Tees, Manu. and Inv.**—High-pressure steam-engine boiler, with increased size of the fire-tube. Locomotive and carriage, buffer and draw spring.
- 11 **HAWTHORN & Co.** Leith, Manu.—High-pressure oscillating steam-engine, of simple construction, without slide, valves, eccentrics, or gearing.
- 12 **EDWARDS, T.** Islington Foundry, Birmingham, Manu.—Patent five-horse power, direct action, high-pressure steam-engine.
- 13 **HICK, B. and Son, Bolton.**—Steam-engine driving Hibbert and Platt’s cotton machinery.
- 14 **SIMPSON & SKIRTON, Trafford St. Manchester.**—Improved reciprocating high-pressure steam-engine, driving Parr, Curtiss, & Madely’s cotton machinery.
- rotatory or revolving steam-pumps or engines for agricultural and other mills, marine engines, and locomotives.—Patented.
- 29 **HODGE and BATLEY, 9 Adam St. Adelphi.**—Steam-engine.
- 34 **BUTTERLEY Co.** Alfreton, near Derby.—Eight-horse oscillating steam-engine.
- 35 **CARRETT, W. E.** 13 Rockingham St. Leeds, Inv. and Pat.—A steam-pump, combining a high-pressure engine and an improved suction and force pump. A portable high-pressure boiler.
- 37 **EVANS & SON, 104 Wardour St. Soho, Manu.**—Steam-engine, six-horse power, simple in construction, portable and economical in working. Want & Vernaum, Pat.
- 38 **MAUDSLAY, SON, & FIELD, Lambeth, Des. and Manu.**—A small double cylinder direct-acting high-pressure steam-engine. Connecting-rod adapted to marine steam-engines, of the collective power of 800 horses. Models of patent marine steam-engines for driving screw propellers, &c. Model of a patent gun-metal screw propeller. (See also Class 6, No. 228.)
- 39 **CLAYTON, SHUTELEWORTH, & Co. Lincoln, Manu.**—Portable steam-engine, starting lever, safety-valve, gauges, whistles, &c., all within reach of the driver.
- 40 **POPE & SON, 81 Edgeware Rd. and Lisson Grove, Manu. and Des.**—Improved oscillating cylinder steam-engine.
- 42 **DONKIN, B. & Co. Bermondsey, Manu. and part Inv.**—Patent disc water-metre, disc engine, and disc pump.
- 44 **ARMSTRONG, W. G.** Newcastle-upon-Tyne.—Model hydraulic crane, steam-engine, accumulator, corn-lift, and hydraulic machine for unshipping coals.
- 45 **LLOYD, E.** Glyndwrda, near Corwen, Wales, Inv.—Patent steam-engine, on the double cylinder expansion principle.
- 46 **SIEMENS, C. W.** Birmingham, Inv.—Working model of a patent chronometric governor. Model of a variable expansion valve. Model of a surface condenser. Water-meter, in action, working under pressure. Regenerative condenser. Working model of a regenerative evaporator.
- 48 **BUNNETT, J. & Co.** 26 Lombard St. City, and Dept-

Ilustración 2.4-3 Fragmento del listado de máquinas de la Gran Exposición de 1851 [11]

3 OBJETO DE ESTUDIO

El motor alternativo de vapor de alta presión de los ingenieros Simpson y Shipton, usado desde 1849 en las granjas de algodón de las compañías Parr, Curtis, and Madeley y Mason, & Co, hace su primera aparición en la escena pública, como se ha visto en el capítulo anterior, en la Gran Exposición de Londres de 1851. Estando expuesto junto a más de 600 máquinas, este modelo consigue el mismo premio que un motor del famoso inventor James Watt, siendo esto todo un logro teniendo en cuenta que es el primer motor de su tipo en la historia.

En el evento destaca por su movimiento original y característico, así como por su fácil y buena adaptación al uso en barcos de vapor y en locomotoras, sorprendiendo a los profesionales del transporte presentes en el evento y superando la desconfianza de la época hacia las máquinas de este tipo.

The present is a step beyond the rotary class, and which all scientific men have hailed with the greatest admiration as an achievement long desired(...) I should think that nothing could so suitably and simply be adapted for the marine trade.- Sherborne Mercury, Tuesday 29 July 1851[12]-

Según [13], escrito por el propio Joseph Simpsom, el motivo que llevo a los ingenieros mancurianos inventar esta máquina fue la falta de eficiencia de los motores de vapor de la época en varios sentidos. Primeramente, la inmensa mayoría de motores obtenían la potencia de movimientos rectilíneos para posteriormente transformar el movimiento en rotatorio. El pistón se movía en el interior del cilindro de forma recta, frenando su movimiento en cierta parte de la carrera para después invertir el sentido del movimiento. Este proceso resultaba ineficiente por el simple hecho de frenar la masa del pistón y volver a ponerlo en movimiento de forma cíclica. El bajo rendimiento de este tipo de máquinas se hacía muy presente en dos casos especiales, en movimientos a alta velocidad, como puede ser el movimiento de los pistones de una locomotora, y en procesos que demandan cierta estabilidad de movimiento ya que el movimiento del pistón estaba lejos de ser continuo y uniforme. Por otro lado, para suplir esta falta de eficiencia y por tanto, la pérdida de potencia, las máquinas se sobredimensionaban, movimiento mayores pesos y necesitando a su vez más potencia para mover los componentes del motor. Cabe mencionar que también se perdía potencia al conectar bielas en ángulos ya que la longitud de esta aumentaba y con ella su peso. También eran necesarias grandes y costosas bases donde anclar las máquinas, aumentando de nuevo el peso y el tamaño del conjunto. Esto era especialmente perjudicial en el caso del transporte, tanto en locomotoras como en barcos de vapor, donde el espacio y el peso estaban estrictamente limitados. En el caso de los barcos de guerra por ejemplo, todas las piezas móviles del motor debían encontrarse debajo de la línea de flotación de la nave, requisito que los motores ordinarios no cumplían fácilmente. Por último, otro de los inconvenientes que presentaban las máquinas de vapor de la época eran las velocidades que alcanzaban los pistones en procesos de alta velocidad, no siendo el movimiento del pistón óptimo para extraer la potencia del vapor. Por tanto parece obvio, y como se verá a continuación, intentar fabricar un motor alternativo con todas las ventajas prácticas de las máquinas rotatorias que entregue directamente el movimiento de revolución deseado sin emplear movimientos rectilíneos y componentes de transformación de movimiento, solventando los inconvenientes encontrados en las máquinas de vapor convencionales.

Cabe destacar que tras la Gran Exposición, al motor de Simpson y Shipton se le atribuye las ventajas de tener una fabricación económica, prescindir de bases costosas, economizar el espacio, tener una buena velocidad de movimiento con una velocidad de pistón baja y obtener el movimiento deseado directamente sin necesidad de emplear posteriores transformadores de movimiento. Sin embargo, aunque en la época se le atribuyera a esta máquina de vapor una construcción económica, tenía el doble de rodamientos, y cuatro veces más bielas y manivelas que una máquina de vapor monocilíndrica convencional, además de necesitar una precisión en la construcción y ensamblaje de las piezas mayor que la mayoría de máquinas.

3.1 Partes y funcionamiento

Una de las características principales de este motor respecto a los convencionales es la sustitución del pistón por una excéntrica, conjunto pistón *b* y eje *c*. El vapor, que entra a través de la válvula *n*, actúa de la misma forma que en un cilindro de una máquina ordinaria de doble efecto, sin embargo, al encontrarse la excéntrica en el cilindro, *a*, en vez de un pistón, al movimiento de traslación común se le añade el de giro de la excéntrica sobre las paredes *d* del cilindro, ilustración 3.1-1.

El movimiento de la válvula que controla el paso de vapor al cilindro, así como el escape del mismo, se encuentra regulado mediante la biela excéntrica *q*, conectada al cigüeñal *p*, ilustración 3.1-2.

También se encuentran conectadas al cigüeñal las bielas *f* y *h*, estando *f* en su otro extremo unido directamente al movimiento del eje *c*, mientras que las bielas *h* están unidas al eje mediante las manivelas *g*. Cabe destacar que las manivelas *g*, al igual que las *i*, están montadas con un ángulo relativo entre ellas de noventa grados, es decir, un ángulo recto, ver ilustración 3.1-3.

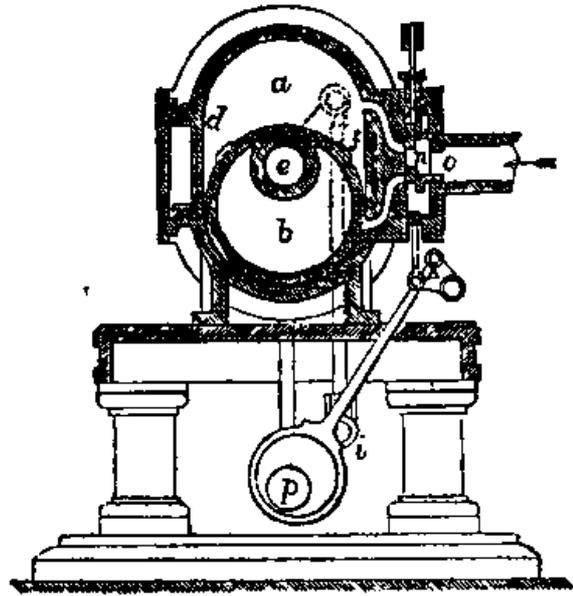


Ilustración 3.1-1 Vista frontal, sección transversal central[14]

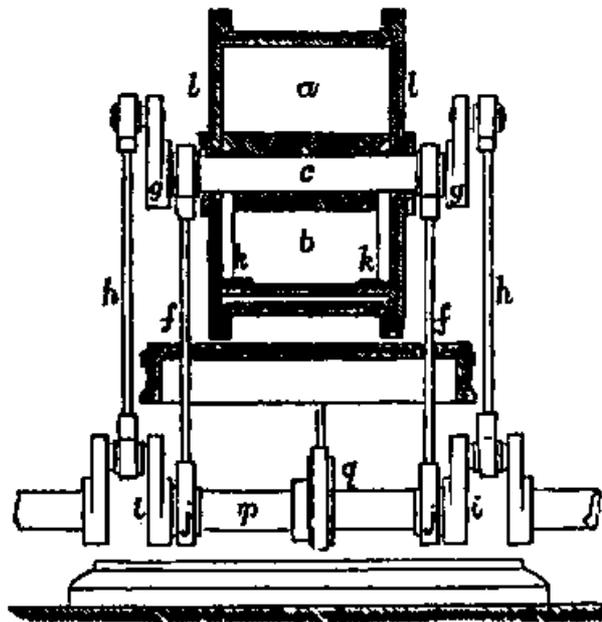


Ilustración 3.1-2 Vista lateral, sección longitudinal central[14]

En cuanto al sellado del pistón con las paredes frontales del cilindro, se emplean unos aros de material sellante que se introducen en las muecas de formas circulares *k* realizadas en las caras paralelas del pistón.

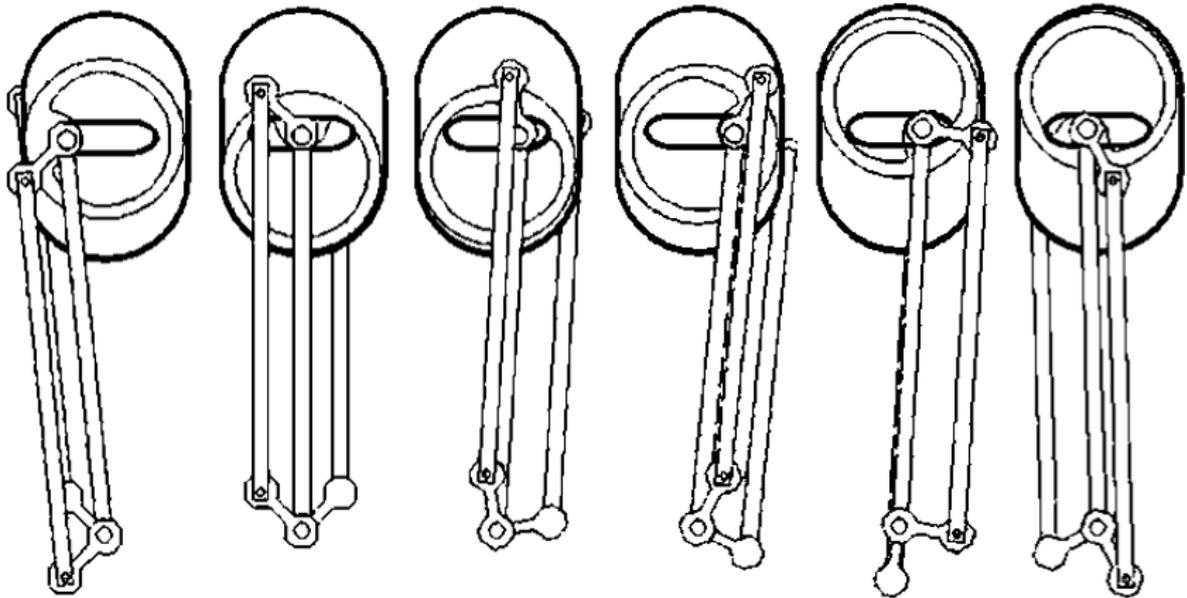


Ilustración 3.1-3 Movimiento conjunto bielas-manivelas y cilindro-excéntrica[15]

3.2 Lista de piezas

La máquina que se va a modelar en este proyecto se encuentra caracterizada en los planos presentes en el anexo A. Siguiendo estos planos, se expone un listado de las distintas piezas a modelar, junto con la cantidad necesaria de cada una de ellas, ordenándolas en subgrupos según su posterior ensamblaje.

En total, el motor está compuesto por 422 piezas, de las cuales 84 son distintas.

Para mayor facilidad a la hora de identificar las piezas, estas se nombran junto a su número identificativo al igual que en los planos de Stewart Hart.

3.2.1 Estructura

Se incluye en esta categoría todas las piezas que sirven de soporte para el resto de componentes de la máquina.

- 1xBase de madera: 01-WOODEN BASE
- 12xPlaca base para columna: 02-COLUMN BASE PLATE
- 24xDisco para columna: 03-COLUMN ROTUND
- 12xColumna: 04-COLUMN
- 1xPlaca de soporte intermedia: 05-BEARING MOUNTING PLATE
- 9xPoste para barandilla: 06-RAIL POST
- 2xPoste de esquina para barandilla: 07-CORNER RAIL POST
- 2xBarandilla corta: 08-HAND RAIL SHORT
- 1xBarandilla larga: 09-HAND RAIL LONG
- 4xBase para soporte de rodamiento: 10-MAIN BEARING HOUSING FOOT
- 4xSoporte inferior de rodamiento: 11-MAIN BEARING LOWER HOUSING
- 4xSoporte superior de rodamiento: 12-MAIN BEARING UPPER HOUSING

- 4xRodamiento: 13-MAIN BEARING
- 1xPlaca base para cilindro: 14-CYLINDER MOUNTING PLATE

3.2.2 Cilindro, pistón y volante de inercia

Se enuncian las piezas que una vez ensambladas forman el conjunto del cilindro.

- 1xCilindro: 15-CYLINDER
- 1xTapa frontal del cilindro: 16-CYLINDER COVER
- 1xTapa lateral cilindro: 17-DUMMY COVER
- 1xCuerpo de la válvula: 18-VALVE CHEST
- 1xAdaptador cuerpo-pasador válvula: 19-VALVE CHEST PACKING BOX
- 1xPasador de la barra de válvula: 20-VALVE CHEST GLAND
- 1xAro sellador del pasador de válvula: 21-VALVE CHEST GLAND SEAL
- 1xEngrasador: 22-OILER
- 1xTapa del engrasador: 23-OILER SCREW COVER
- 1xVolante de inercia: 26-FLYWHEEL
- 1xPistón: 31-PISTON
- 2xAnillo sellador del pistón: 32-PISTON RING SEAL
- 1xEje del pistón: 33-PISTON ROD

3.2.3 Bielas, manivelas y espaciadores

- 1xExtremo del cigüeñal del volante de inercia: 25-CRANK SHAFT FLYWHEEL END
- 1xManivela del extremo delantero del cigüeñal: 27-CRANK SHAFT FRONT END CRANK
- 1xManivela del extremo del cigüeñal del volante de inercia: 28-CRANK SHAFT FLYWHEEL END CRANK
- 2xManivela del extremo del eje del pistón: 29-PISTON ROD CRANK END
- 1xExtremo delantero del cigüeñal: 30-CRANK SHAFT FRONT END
- 2xBiela interior: 34-INNER CON ROD
- 2xEspaciador pistón-biela interior: 35-PISTON ROD SPACER
- 2xBiela exterior: 36-OUTER CON ROD
- 7xEspaciador manivela-biela pistón: 37-PISTON ROD CRANK SPACER
- 2xEspaciador del cigüeñal: 38-CRANK SHAFT SPACER
- 1xAnillo retenedor de biela: 39-CON ROD RETAINER COLLAR
- 1xManivela de unión volante de inercia-cigüeñal: 40-FLYWHEEL CRANK SHAFT COUPLING CRANK
- 1xVástago de la válvula: 42-VALVE STEM
- 1xSoporte de manivela de la válvula: 43-VALVE CRANK BRACKET

- 1xPolea Excéntrica: 44-ECCENTRIC SHEAVE
- 1xBiela excéntrica: 45-ECCENTRIC STRAP
- 1xEje de la manivela de válvula: 46-VALVE BRACKET PIVOT PIN
- 1xBrazo central de biela de válvula: 47-CENTRAL VALVE CRANK ARM
- 2xBrazo exterior de biela de válvula: 48-OUTER VALVE CRANK ARM
- 2xBiela lateral de válvula: 49-VALVE SIDE ROD
- 1xVigueta cruzada para bielas de válvula: 50-VALVE STEM CROSS BEAM

3.2.4 Válvula y bloque de suministro

- 1xVálvula corredera: 41-SLIDE VALVE
- 1xCuerpo de válvula de parada: 51-STOP VALVE BODY
- 1xTapa superior de válvula de parada: 52-STOP VALVE TOP COVER
- 1xHusillo de válvula de parada: 53-STOP VALVE SPINDLE
- 4xTornillo espaciador del husillo: 54-SPINDLE SPACER BOLT
- 1xSellador de válvula de parada: 55-STOP VALVE SEAL
- 1xTuerca de husillo de válvula de parada: 56-STOP VALVE SPINDLE NUT
- 1xRueda manual de válvula de parada: 57-STOP VALVE HAND WHEEL
- 1xTubo de suministro de vapor a la válvula de parada: 58- STOP VALVE STEAM SUPPLY PIPE
- 1xBloque conector de suministro de vapor: 59-STEAM SUPPLY CONNECTOR BLOCK
- 1xTapón de cuerpo de válvula: 60-VALVE CHEST PLUG

3.2.5 Tornillos, tuercas, arandelas y pasadores

- 9xTuerca M2: M2 NUT
- 3xPasador M2x7: M2x7 ROLLPIN
- 8xPasador M2x12: M2x12 ROLLPIN
- 8xTornillo cabeza hexagonal M2x8: M2x8 HEX BOLT
- 10xTuerca M2.5: M2.5 NUT
- 48xArandela M2.5: M2.5 WASHER
- 38xTornillo cabeza hexagonal M2.5x8: M2.5x8 HEX BOLT
- 2xTornillo cabeza hexagonal M2.5x10: M2.5x10 HEX BOLT
- 8xEspárrago M2.5x23: M2.5x23 STUD
- 2xEspárrago M2.5x26: M2.5x26 STUD
- 19xTuerca M3: M3 NUT
- 29xArandela M3: M3 WASHER
- 2xTornillo cabeza hexagonal M3x10: M3x10 HEX BOLT
- 8xTornillo cabeza hexagonal M3x16: M3x16 HEX BOLT
- 6xEspárrago M3x18: M3x18 STUD
- 8xTornillo Avellanado M3x31: M3x31 C-SINK SCREW

- 4xTornillo ciego M3x4: M3x4 GRUB SCREW
- 12xTuerca M4: M4 NUT
- 6xTurca hexagonal con cúpula M4: M4 DOME NUT
- 18xArandela M4: M4 WASHER
- 6xTornillo Avellanado M4x14: M4x14 C-SINK SCREW
- 1xEspárrago M4x20: M4x20 STUD
- 12xEspárrago M4x24: M4x24 STUD
- 4xEspárrago M4x30: M4x30 STUD
- 8xEspárrago M4x40: M4x40 STUD

4 CATIA V5R19

Los programas de diseño asistido por ordenador, computer aided design o CAD, son software que facilitan al usuario la creación, modificación, análisis y optimización de piezas o conjuntos de piezas que pueden ser mas o menos complejas. Otras funciones principales de este tipo de programas es la obtención de planos y códigos compatibles con maquinas de mecanizado, englobando de esta forma el proceso completo, desde la creación de la pieza hasta su fabricación.

Entre los softwares CAD de uso profesional, destacan varios desarrolladores como Dassault Systèmes SE, Autodesk o Siemens. El primero de ellos creó dos programas informáticos internacionalmente conocidos, Solidworks y CATIA (Computer-Aided Three dimensional Interactive Application).

En cuanto al software NX de Siemens, proviene de una serie de mejoras realizadas a lo largo de los años a varios programas CAD, teniendo su base en el software UNIAPT lanzado al mercado en el año 1969, siendo uno de los primeros productos CAM (Computer Aided Manufacturing) del mundo.

Por último, el software AutoCAD hizo su aparición en el mercado en el año 1982. Perteneciente a la empresa Autodesk, es uno de los programas mas usados para dibujo 2D y modelado 3D a nivel global por arquitectos, ingenieros y diseñadores industriales. Las primeras versiones de AutoCAD, al igual que ocurre con el software NX, proviene de la mejora de otro programa llamado Interact CAD o MicroCAD lanzado en 1979, 10 años más tarde que UNIAPT.

Como se ha expuesto en el resumen y la introducción, el programa de diseño asistido por ordenador elegido para la realización del proyecto es el software CATIA, concretamente la versión V5R19. Se ha seleccionado este software entre los citados por dos motivos, ser especialmente usado en el sector aeronáutico y automovilístico y además ser el software impartido en el grado de ingeniería aeroespacial.

Los módulos y herramientas usadas en los distintos procesos del proyecto serán explicados en profundidad en los respectivos apartados de modelado, ensamblado y animación.

4.1. Historia

CATIA, inicialmente llamado CATI, en francés, Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive[16], fue creado en 1971 para la producción de aviones de la empresa francesa Avions Marcel Dassault[17], en 1981 esta empresa creó una filial llamada Dassault Systèmes para el desarrollo y distribución del software CATIA.

Tiempo después, CATIA fue empleado en sectores distintos al aeroespacial, como el sector automovilístico (grupo VW, BMW, Renault, Peugeot, Porsche...), el sector náutico o bien la industria de la construcción. En cuanto a su uso en el sector aeronáutico, cabe destacar empresas de la envergadura de Airbus, Boieng, BAE Systems, siendo este el segundo mayor contratista militar a nivel mundial y por último el fabricante aeronáutico brasileño, Embraer.

Desde su lanzamiento, las versiones han ido sucediéndose hasta la actualidad, innovando y mejorando continuamente el software, siendo la última versión estable la versión V5-6R2019. Actualmente CATIA incorpora una gran variedad de módulos orientados a actividades específicas como el diseño y desarrollo de sistemas eléctricos, diseño con materiales compuestos, validación de diseños industriales, simulación y generación de códigos de mecanizado o bien el módulo de cálculo estructural entre otros.

Tabla 1 Versiones de Software CATIA

Nombre	Versiones	Fecha lanzamiento
Catia v1		1981
Catia v2		1984
Catia v3		1988
Catia v4		1993
Catia v5		1998
Catia v5	R7	2001
Catia v5	R17	2006
Catia v5	R18	2007
Catia v5	R19	2008
Catia v6	R2010	2009
Catia v5	R20	2010
Catia v5	R21	2011
Catia v6		2011
Catia v5-6	R2012	2012
Catia v5-6	R20	2013
Catia v5-6	6R	2014
Catia v5-6	6R	2015
Catia v5-6	6R	2016
Catia v5-6	6R	2017
Catia v5-6	6R	2018
Catia v5-6	6R	2019

5 MODELADO

El primer paso que se realiza en CATIA es el modelado de todas las piezas que intervienen en el motor siguiendo los planos que pueden encontrarse en el anexo A. En cuanto a los tornillos, tuercas, arandelas y pasadores que aparecen en la lista de piezas pero que no aparecen en los planos, se emplean medidas normalizadas encontradas en planos de fabricantes según las métricas indicadas en cada caso.

La estructura de este apartado se divide en dos, inicialmente se exponen los módulos y herramientas empleadas para el modelaje y posteriormente se explica el proceso seguido para modelar cada pieza por separado.

5.1 Módulos y herramientas

Para el modelaje de las piezas se han usado dos módulos, aunque uno de ellos solo se ha usado para un fin concreto. El módulo que se ha empleado principalmente es el de Part Design, mientras que para la realización de hélices para conseguir el efecto de moleteado, como se verá en el listado de piezas, se ha usado el módulo de Generative Shape Design.

5.1.1 Sketch

La herramienta *Sketch* permite crear geometrías diversas en 2D. Para poder usar esta herramienta se debe seleccionar un plano de referencia ya sea directamente en nuestra pieza o bien en el árbol de especificaciones.

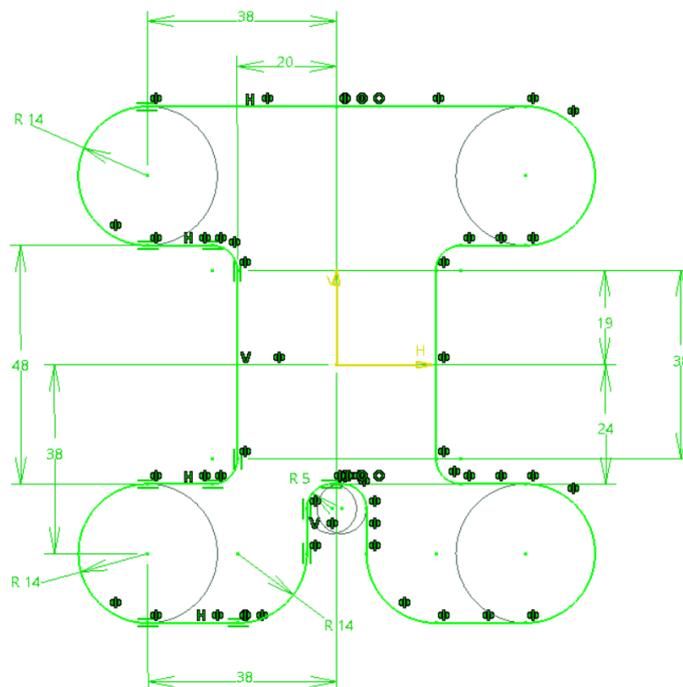


Ilustración 5.1-1 Ejemplo *Sketch*

Como se aprecia en la ilustración 5.1-1, para realizar las figuras en dos dimensiones se pueden emplear multitud de elementos como circunferencias, arcos de circunferencias, líneas rectas, restricciones de medidas, de

tangencia o simetría. Todas las herramientas internas al *sketch* usadas para modelar el motor S&S se exponen a continuación.

5.1.1.1 Construction/ Standart Element

Activando/desactivando este icono se consigue que un elemento, ya sea un punto, una línea o un arco, pase de ser un elemento estándar (icono desactivado) a uno de construcción (icono activado), es decir que no es considerado parte del dibujo. En CATIA los elementos de construcción en los sketches se diferencian por estar representados con líneas discontinuas

5.1.1.2 Constraint

El primer icono es el correspondiente a la herramienta *Constraints Defined in Dialog Box* y permite establecer condiciones de dimensiones o relaciones entre elementos de paralelismo, perpendicularidad, distancia, ángulo, horizontalidad, verticalidad, punto medio, concetricidad, simetría o tangencia entre otros. Ver ilustración 5.1-2. El segundo icono, en cambio, permite establecer de forma rápida y general restricciones a un elemento, dimensión, o varios elementos, ángulo o distancia.



Ilustración 5.1-2 *Constraints Defined in Dialog Box*

5.1.1.3 Profile

Esta herramienta permite crear una sucesión de líneas y arcos a voluntad del usuario.

5.1.1.4 Rectangle

Abriendo el desplegable de esta herramienta aparecen otras nueve, de las cuales únicamente se han empleado las herramientas *Centered Rectangle* y *Hexagon*, iconos 7 y 8 de la ilustración 5.1-3 respectivamente. La primera de ellas permite realizar un rectángulo una vez seleccionado su centro. En cuanto a la segunda, de nuevo

habiendo elegido el centro, crea un hexágono circunscrito en una circunferencia de radio introducido por el usuario.



Ilustración 5.1-3 Desplegable de la herramienta *Rectangle*

5.1.1.5 Circle

De este desplegable se han usado la primera herramienta, *Circle*, y la última, *Arc*. *Circle* permite hacer una circunferencia habiendo elegido su centro, mientras que la herramienta *Arc* crea un arco de circunferencia mediante tres clicks de ratón, el primero para elegir el centro y los otros dos para definir el punto de inicio y fin del arco.



Ilustración 5.1-4 Desplegable de la herramienta *Circle*

5.1.1.6 Trim

El primer icono del desplegable corresponde con la herramienta *Trim*, con ella se puede relimitar una línea ya sea recta o curva. Otra herramienta usada es la herramienta *Break* (segundo icono), como el propio nombre indica al usarla se rompe el elemento en el punto seleccionado, obteniendo dos elementos independientes.

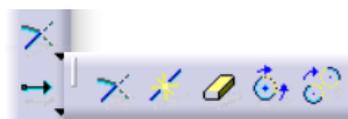


Ilustración 5.1-5 Desplegable *Trim*

El último útil que se ha usado de este desplegable es *Quick Trim* (icono de borrador). Esta herramienta borra el tramo de línea seleccionado hasta la intersección con otra línea. El uso de *Quick Trim* resulta apropiado en la creación de geometrías que se obtienen mediante intersecciones de distintos elementos.

5.1.1.7 Mirror

Las herramientas *Mirror* y *Symmetry*, primer y segundo icono respectivamente de la ilustración 5.1-6 empezando por la izquierda, funcionan de forma análoga, inicialmente se selecciona el elemento sobre el cual se quiere actuar y el objeto de simetría, pudiendo ser una línea o un plano. La diferencia entre estas dos herramientas reside en que *Mirror* mantiene el elemento de partida y establece una relación entre el elemento inicial y su “copia”, de manera que si se modifica alguno de ellos el otro cambia automáticamente. *Symmetry*, en cambio, no crea un nuevo elemento, convierte el elemento seleccionado en su simétrico respecto al objeto

elegido.

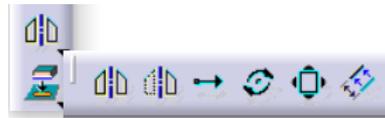


Ilustración 5.1-6 Desplegable *Mirror*

5.1.1.8 Project 3D Elements

Esta herramienta, empleada en varias ocasiones a lo largo del modelado, permite proyectar una geometría en tres dimensiones sobre el plano en el que se esté realizando el *Sketch*.

5.1.2 Pad

Puede considerarse como la base en el diseño de piezas 3D, permite darle volumen a las geometrías en dos dimensiones realizadas mediante *Sketches*. Esta herramienta permite elegir la dirección y los límites de la extrusión. Entre los tipos de límites disponible se encuentran, límite por dimensión insertada manualmente, extrusión hasta el siguiente elemento, hasta el último elemento, hasta un plano o hasta una superficie. Si se selecciona la opción de *Mirrored extent*, la extrusión se realiza en el sentido elegido y en su opuesto.

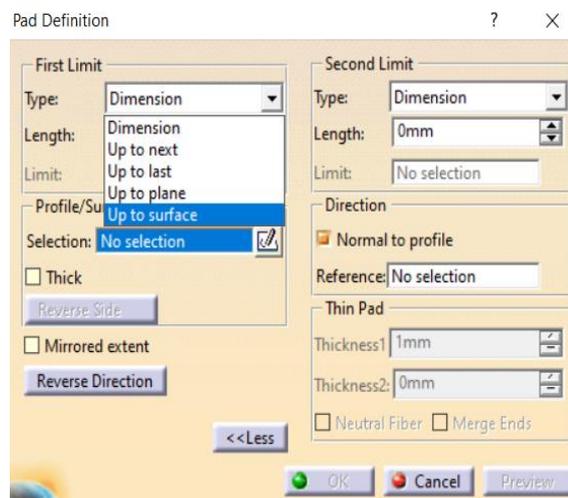
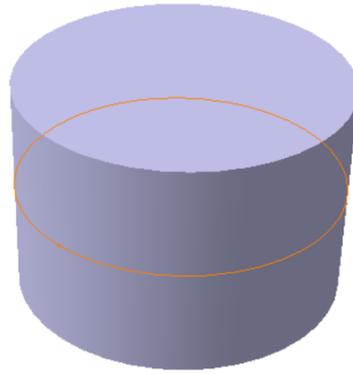
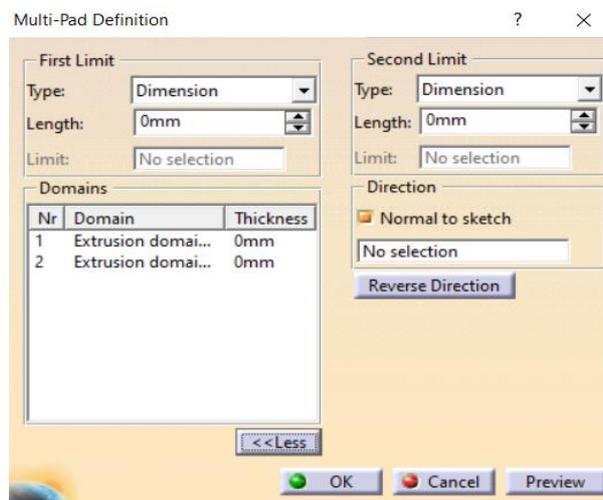
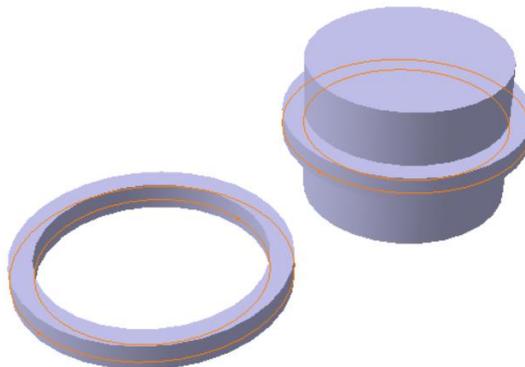


Ilustración 5.1-7 Ventana de propiedades extendidas *Pad*

Ilustración 5.1-8 *Pad* a una circunferencia empleando la opción *Mirrored extent*

5.1.3 Multi-Pad

La función de esta herramienta es similar a la del *Pad*, con la diferencia que permite extruir geometrías con varios dominios, ver ilustración 5.1-9. Se trata de una herramienta muy útil ya que permite obtener directamente resultados que se obtendrían mediante el uso de varias herramientas.

Ilustración 5.1-9 Ventana de propiedades extendidas *Multi-Pad*Ilustración 5.1-10 *Multi-Pads* con límites distintos a un mismo *Sketch*

5.1.4 Pocket

Como se aprecia en la ventana de propiedades de *Pocket*, ilustración 5.1-11, su definición es idéntica a la de un *Pad*, se selecciona un perfil, una dirección y unos límites. Esta herramienta puede entenderse de forma sencilla como la operación inversa a un extrusión.

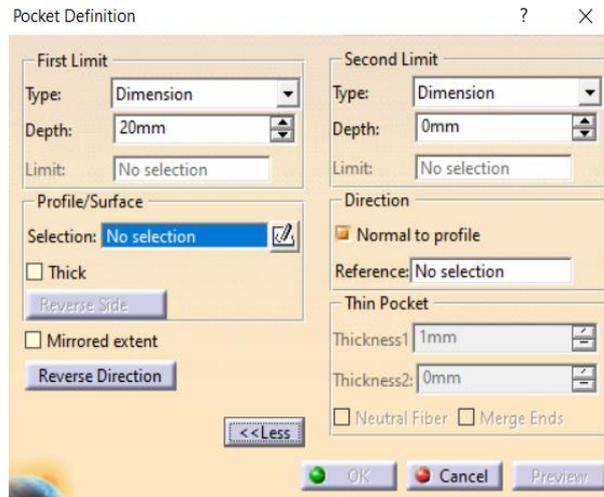


Ilustración 5.1-11 Ventana de propiedades extendidas *Pocket*

5.1.5 Shaft

Esta herramienta permite crear sólidos en tres dimensiones, macizos o con espesor, mediante revolución de geometrías. Para su uso es necesario definir la geometría y el eje sobre el cuál se desea realizar la revolución, una vez definidos estos elementos, se establecen los ángulos límites entre 0 y 360 grados.

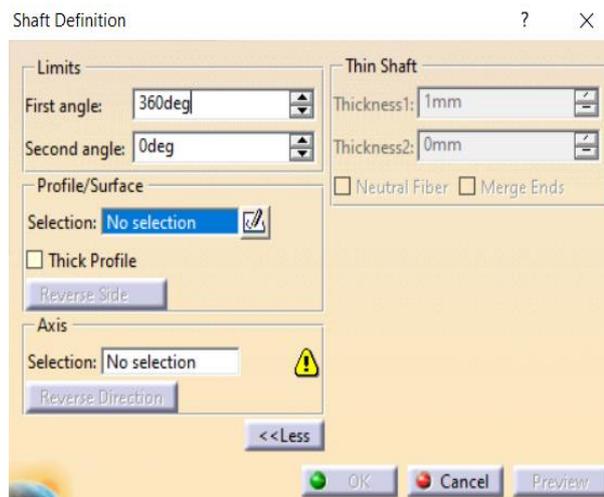
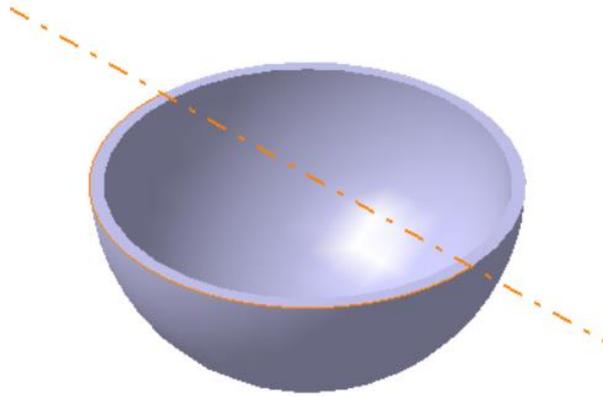
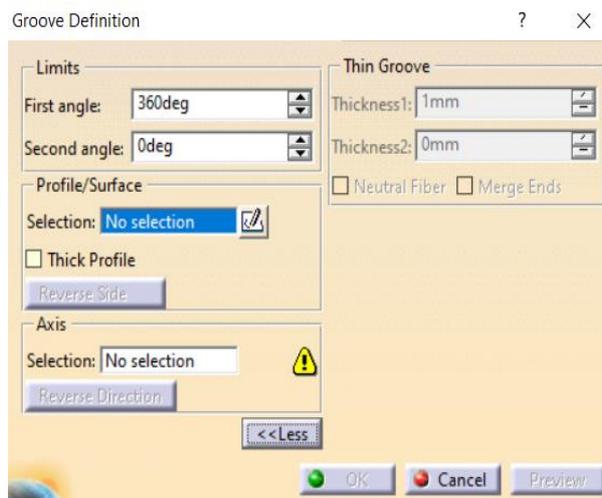


Ilustración 5.1-12 Ventana de propiedades extendidas *Shaft*

Ilustración 5.1-13 *Shaft* con espesor

5.1.6 Groove

Mediante esta herramienta es posible crear una ranura partiendo de un perfil 2D y haciéndolo girar sobre un eje definido por el usuario. De la misma forma que el útil *Pocket* se podía considerar la acción inversa de un *Pad*, un *Groove* puede entenderse como el inverso de un *Shaft*, teniendo unas ventanas de definición idénticas.

Ilustración 5.1-14 Ventana de propiedades extendidas *Groove*

5.1.7 Hole

Se usa para la realización de agujeros en cuerpos tridimensionales permitiendo al usuario la elección del tipo, diámetro, profundidad, longitud y tipo de rosca y tipo de límites entre otros parámetros.

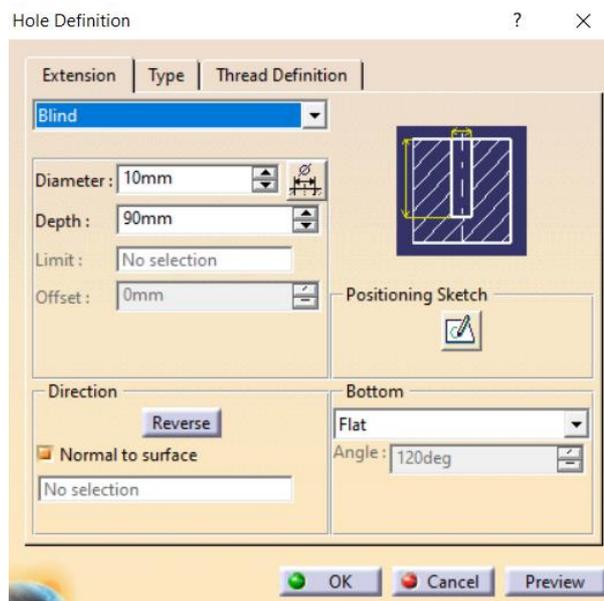


Ilustración 5.1-15 Ventana de propiedades *Hole, Extension*

En la pestaña *Extension* de la ventana de definición de esta herramienta puede seleccionarse el tipo de agujero según su profundidad entre: *blind*, *up to next*, *up to last*, *up to plane* y *up to surface*. También se introduce el diámetro, la profundidad, la dirección y la ubicación del agujero mediante un *Sketch*.

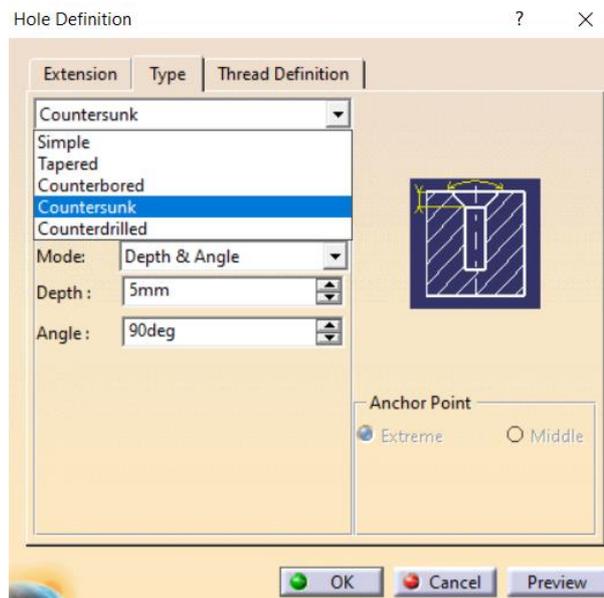
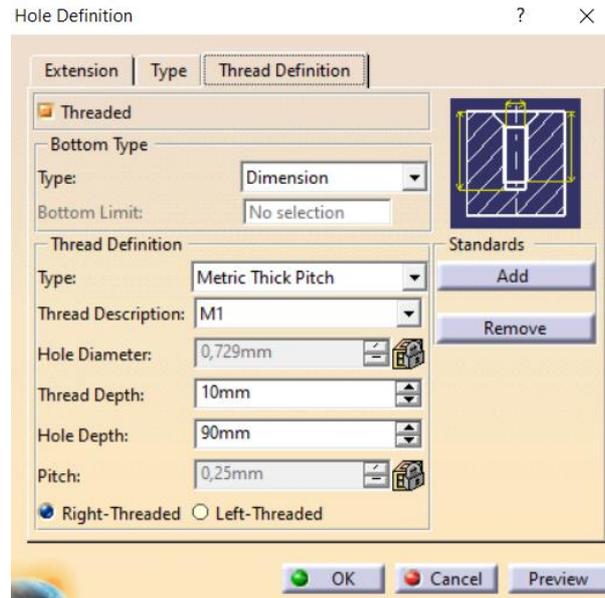


Ilustración 5.1-16 Ventana de propiedades *Hole, Type*

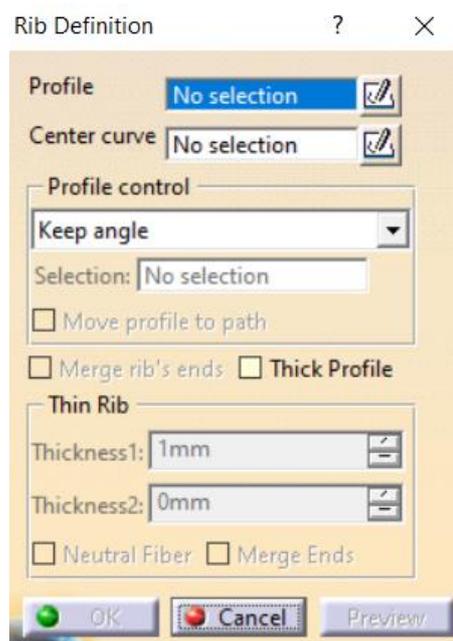
En la segunda pestaña se encuentra el desplegable con los tipos de agujeros predefinidos de CATIA. Puede variarse el modo de creación para ajustar los parámetros de ángulo, profundidad y diámetro según la necesidad del usuario.

Ilustración 5.1-17 Ventana de propiedades *Hole, Thread Definition*

Por último, todos los parámetros relacionados con la rosca del tornillo se modifican en la pestaña *Thread Definition*, se puede modificar la longitud de rosca, diámetro, el paso de rosca o el sentido de roscado. En el desplegable de *Thread Description* se encuentra un listado de métricas normalizadas desde M1 hasta M64, aunque, si no fuese suficiente, existe la posibilidad de añadir nuevas definiciones de roscas a partir de librerías pulsando el botón *Add*.

5.1.8 Rib

La herramienta *Rib* permite extruir un perfil cerrado en dos dimensiones siguiendo una curva previamente creada por el usuario. En el desplegable *Profile control* se elige el parámetro de control que debe seguir el perfil a lo largo de la curva guía.

Ilustración 5.1-18 Ventana de propiedades *Rib*

5.1.9 Slot

Si la herramienta que se acaba de definir, *Rib*, añade material siguiendo una guía cualquiera, *Slot* es idéntico con la diferencia que elimina la parte del sólido que se encuentra en la trayectoria del perfil. La ventana de definición es análoga a la vista en la herramienta anterior y es necesario, por tanto, definir los mismos elementos para poder realizar la acción.

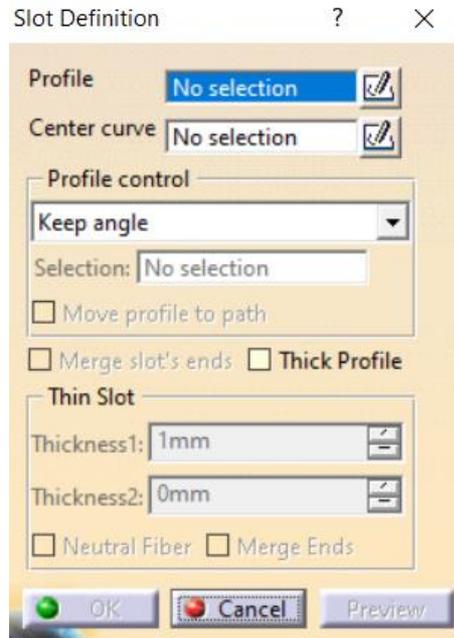


Ilustración 5.1-19 Ventana de propiedades *Slot*

5.1.10 Edge Fillet

Esta operación redondea, con el radio y partiendo del elemento límite definido, las aristas seleccionadas manteniendo inalteradas las introducidas en *Edge(s) to keep*. Las aristas pueden ser exteriores o interiores, quitándose o añadiéndose material respectivamente.

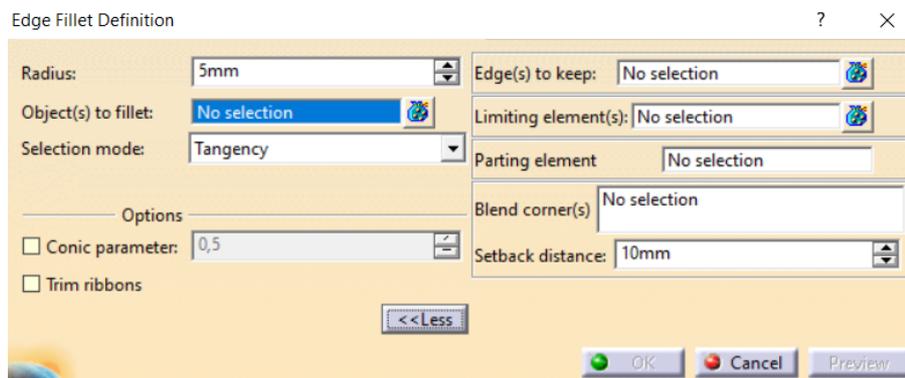
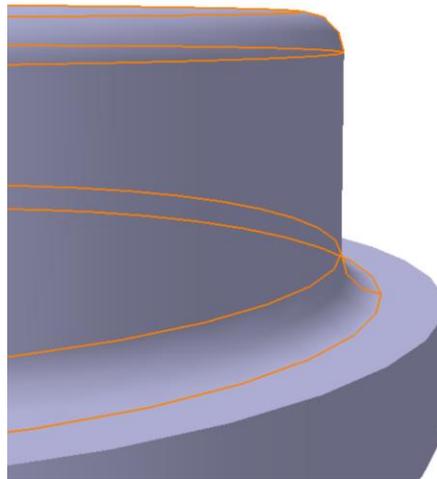
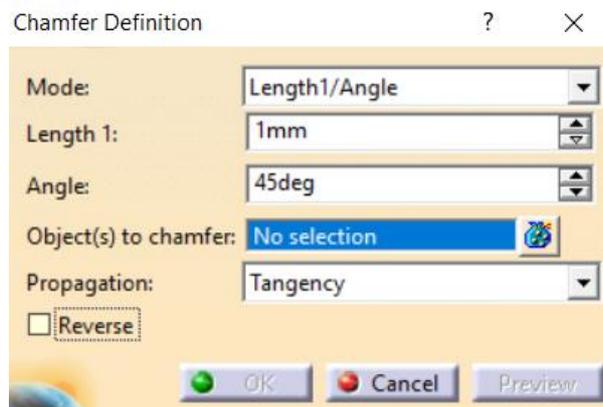
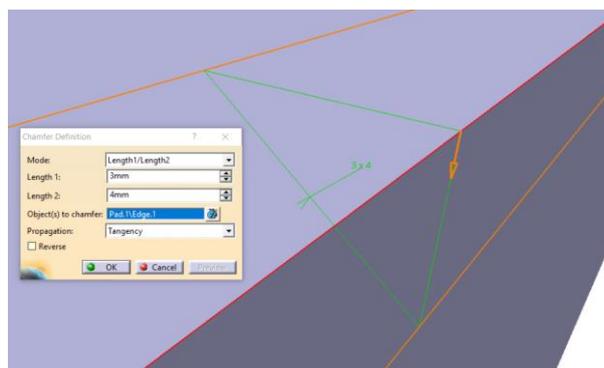


Ilustración 5.1-20 Ventana de propiedades extendidas *Edge Fillet*

Ilustración 5.1-21 *Edge Fillet* interior y exterior

5.1.11 Chamfer

Esta herramienta permite realizar chaflanados en aristas exteriores o interiores. Para ello, se debe seleccionar las aristas a chaflanar, elegir en *Mode* los parámetros de control del chaflán e introducir sus valores. En el desplegable *Mode* se tienen dos opciones, longitud y ángulo y dos longitudes, ver ilustración 5.1-22.

Ilustración 5.1-22 Ventana de propiedades *Chamfer*Ilustración 5.1-23 *Chamfer*, modo dos longitudes

5.1.12 Thread

La operación *Thread* permite crear roscas en elementos cilíndricos ya sean machos o hembras, su definición es análoga a la descrita en la herramienta *Hole* por lo que se obvia aquí su explicación.

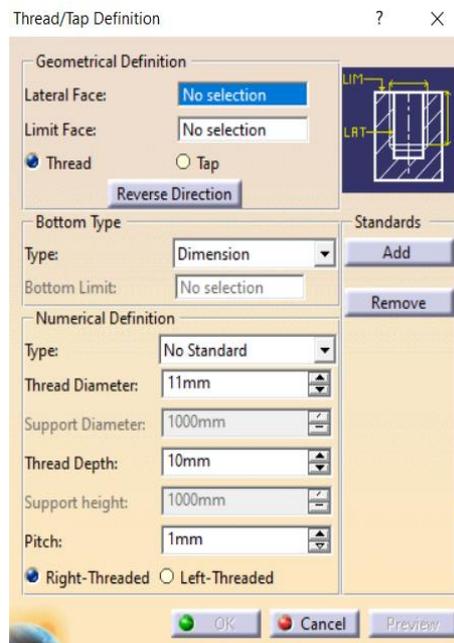


Ilustración 5.1-24 Ventana de propiedades *Thread*

5.1.13 Pattern

Existen tres herramientas *Pattern*, se explican siguiendo el orden de los iconos correspondientes a la ilustración 5.1-25.

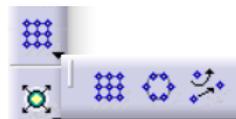
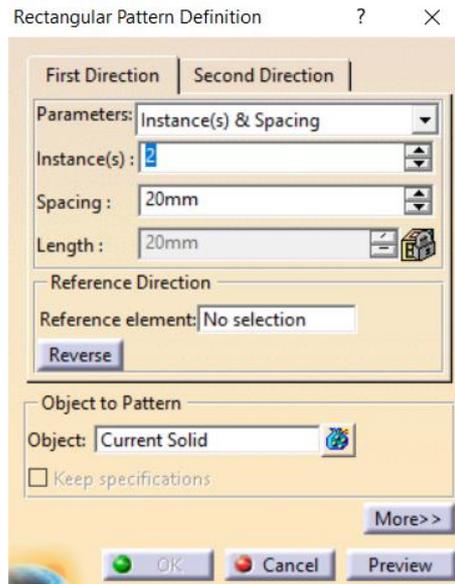
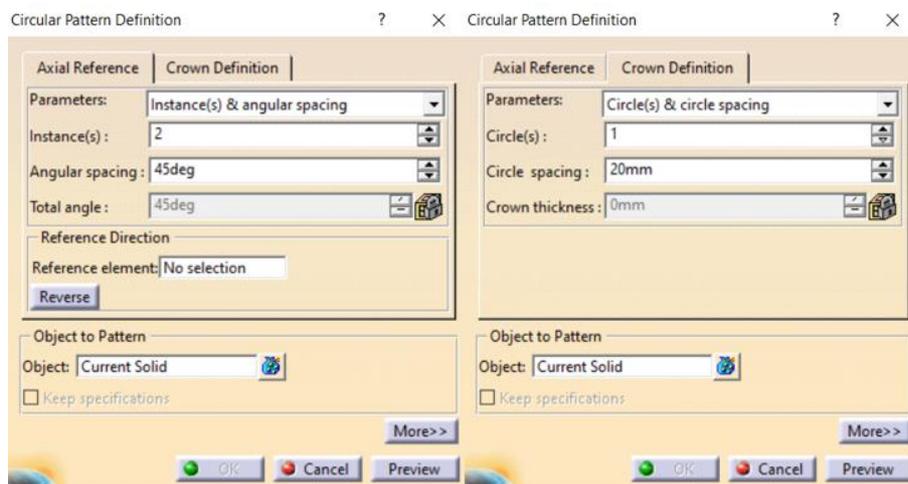


Ilustración 5.1-25 Desplegable *Pattern*

La primera, *Rectangular Pattern*, permite repetir un objeto siguiendo un patrón rectangular siguiendo los parámetros introducidos por el usuario. La ventana de definición cuenta con dos pestañas, *First Direction* y *Second Direction*, siendo su contenido idéntico y permitiendo definir el patrón rectangular en su totalidad. En *Parameters* puede elegirse una combinación de dos de los siguientes parámetros: número de repeticiones, espaciado entre cada una de ellas o bien la distancia total entre la primera repetición y la última.

Ilustración 5.1-26 Ventana de propiedades *Rectangular Pattern*

La segunda, *Circular Pattern*, permite crear un patrón de revolución eligiendo el objeto a copiar y un elemento de referencia, pudiéndose ser un eje perpendicular a la superficie sobre la cual se desea clonar el objeto o la propia superficie. Los parámetros axiales se introducen en la primera pestaña, *Axial Reference*, de nuevo se elige una combinación de dos parámetros entre: número de copias, ángulo entre copias y ángulo total. En cuanto a la pestaña, *Crown Definition*, sus parámetros se emplean para modificar las características en la dirección radial y al igual que en la referencia axial se puede elegir combinaciones entre tres parámetros, número de coronas, espacio entre coronas y espacio total entre la primera corona y la última.

Ilustración 5.1-27 Ventana de propiedades *Circle Pattern*

Por último, la herramienta *User Pattern*, permite repetir un objeto siguiendo un patrón de puntos cualquiera creado por el usuario anteriormente en un *Sketch*.

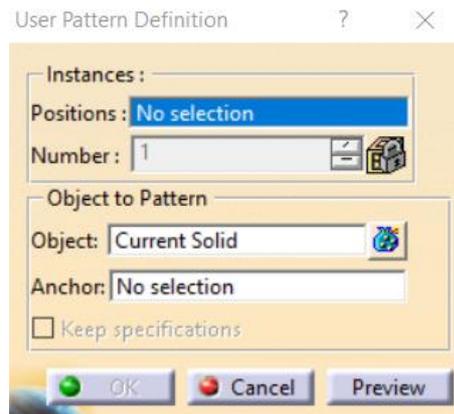


Ilustración 5.1-28 Ventana de propiedades *User Pattern*

5.1.14 Helix

La operación *Helix* permite crear hélices seleccionando un punto inicial y un eje. Algunos de los parámetros de la hélice que esta herramienta permite modificar son: el paso, la altura, el sentido de la hélice, el ángulo de partida o bien la variación del radio.

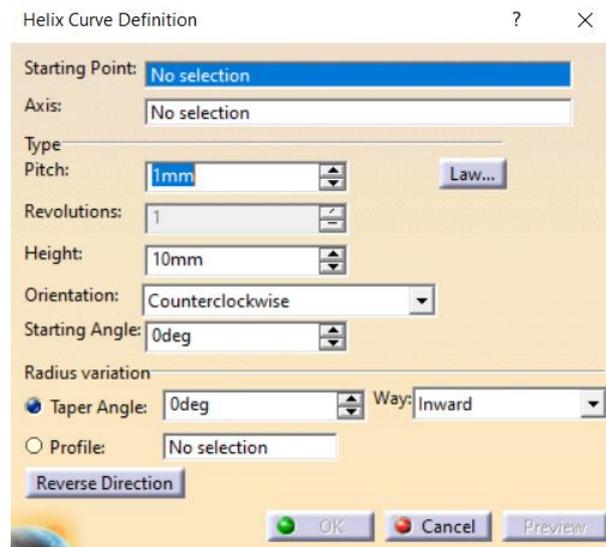


Ilustración 5.1-29 Ventana de propiedades *Helix*

5.2 Piezas

Se pasa a describir la función y el proceso seguido para el modelaje en CATIA V5 para cada pieza siguiendo la división realizada en la lista del apartado 3.2 de este documento. En cada subapartado correspondiente a las piezas se incluyen los planos individuales obtenidos de los planos generales y puestos a limpio mediante un programa de Photoshop, así como la vista isométrica del modelo de la pieza en cuestión.

5.2.1 Estructura

En este apartado se incluyen todas las piezas relativas a la estructura de la máquina.

5.2.1.1 Base de madera

Para la primera pieza, el soporte de la máquina, se realiza un *Sketch* con las dimensiones de la base para posteriormente usar la herramienta *Pad*. Al sólido en tres dimensiones que se obtiene se le quita material con dos herramientas, *Hole* y *Pocket*, para hacer los agujeros y la hendidura central respectivamente. Para terminar se usa la herramienta *Chamfer* en las aristas superiores de la base y de la hendidura siguiendo las dimensiones aportadas por la ilustración 5.2-1. Una vez terminada la pieza se le asigna el material *Kingwood*.

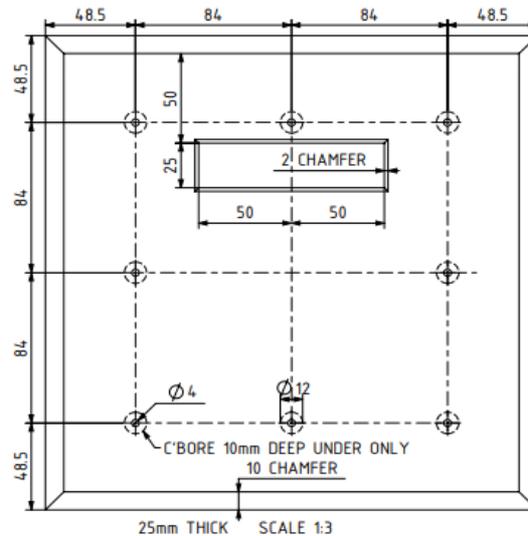


Ilustración 5.2-1 Plano, base de madera



Ilustración 5.2-2 Pieza, base de madera

5.2.1.2 Placa base para columna

De nuevo la primera operación realizada es un *Sketch* con la forma base de la pieza para después ejecutar un *Pad* de 6mm. El agujero central roscado con métrica M4 se consigue mediante la herramienta *Hole*, teniendo que realizar un *Sketch* para posicionar el agujero en el centro de la pieza. El material de la placa base para las columnas es *Brass*, es decir, latón.

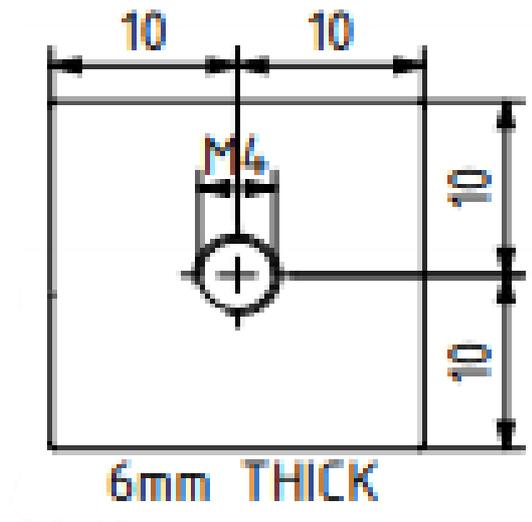


Ilustración 5.2-3 Plano, placa base para columna

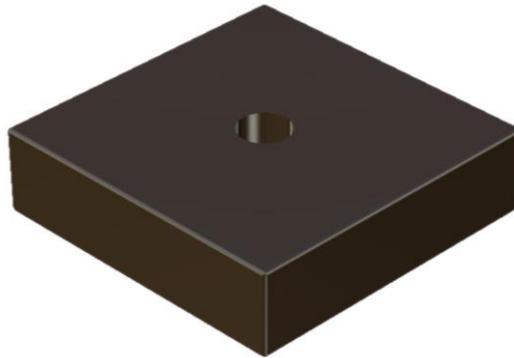


Ilustración 5.2-4 Pieza, placa base para columna

5.2.1.3 Disco para columna

Esta pieza de latón se sitúa en cada uno de los dos extremos de todas las columnas. Se ha realizado hacienda un *Sketch* circular, al que se le ha aplicado un *Pad* de 2mm, para finalmente un *Edgefillet* de tal manera que se consiguen los dos milímetros buscados. Este proceso se podría haber sustituido con un *Sketch* de la vista lateral de la pieza, realizando un *Shaft* para revolucionar el perfil, ahorrando así una operación. En cuanto al agujero roscado M4 central de nuevo se usa la herramienta *Hole*.

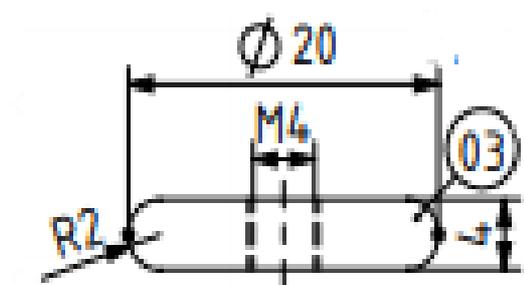


Ilustración 5.2-5 Plano, disco para columna



Ilustración 5.2-6 Pieza, disco para columna

5.2.1.4 Columna

Las columnas se modelan de forma sencilla mediante un *Pad* a un *Sketch* circular de diámetro 14mm. Los dos agujeros se realizan mediante dos operaciones *Holes* idénticas en cada extremo del cilindro.

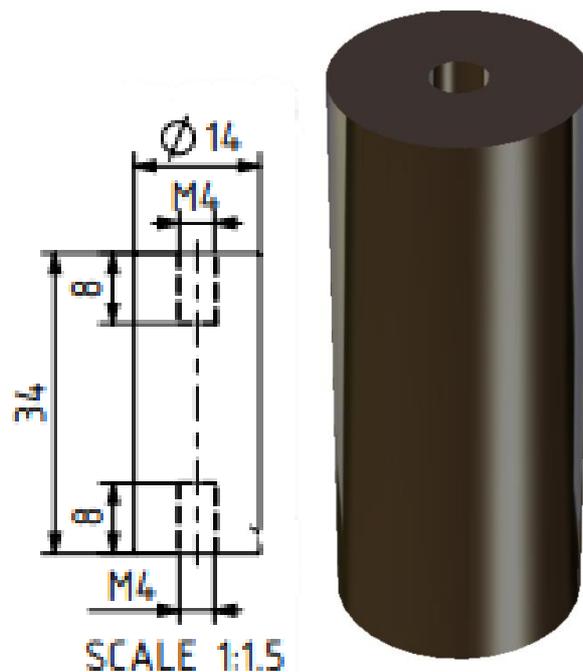


Ilustración 5.2-7 Plano, columna

5.2.1.5 Placa de soporte intermedia

La estrategia seguida para modelar esta pieza de aluminio es la misma que en las piezas anteriores, primero se obtiene un sólido en tres dimensiones mediante un *Sketch* y un *Pad* y luego se retira material con operaciones de *Hole* y *Pocket*. En este caso se hace uso de la herramienta *Rectangular Pattern* y *Mirror* para obtener la distribución de agujeros en la placa base. En esta pieza encontramos tres tipos de agujeros: M3, agujero simple de diámetro 4mm y agujero avellanado en la parte inferior de la placa, también de 4 milímetros de diámetro. Por último para redondear las aristas interiores y exteriores de la placa se realiza un *Edgefillet*.

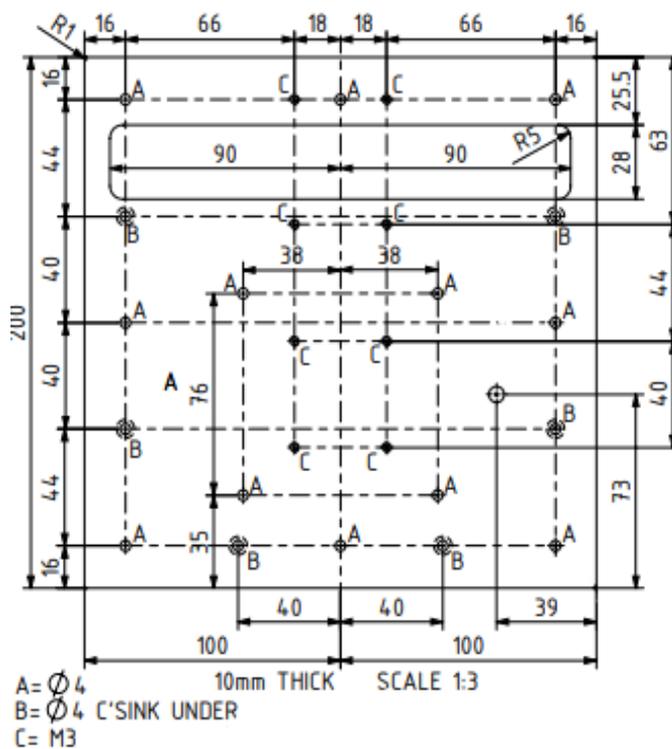


Ilustración 5.2-8 Plano, placa de soporte intermedia

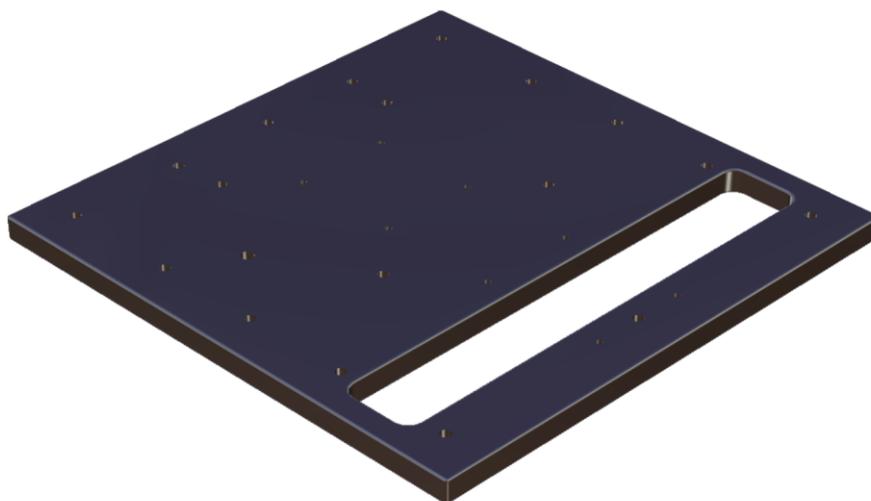


Ilustración 5.2-9, Pieza, placa de soporte intermedia

5.2.1.6 Poste para barandilla

Tras un primer *Pad* de una circunferencia de diámetro 7mm, se realiza sobre la superficie superior de este un nuevo *Pad* a un *Sketch* de una circunferencia de radio 2,5mm hasta alcanzar los 28 milímetros de altura del poste. Una vez se tiene la forma de la pieza en bruto se realizan dos *Edgefillet* para conseguir las superficies redondeadas y dos operaciones de *Hole* correspondiente al agujero roscado inferior del poste y al agujero de radio 1mm situado a 6 milímetros del extremo superior del poste. En cuanto al material del poste, siguiendo las indicaciones de S.Hart, se le asigna latón.

De nuevo, existen otra formas de modelar esta pieza, como sería un *Sketch* del contorno del poste para después revolucionarlo sobre su eje central.

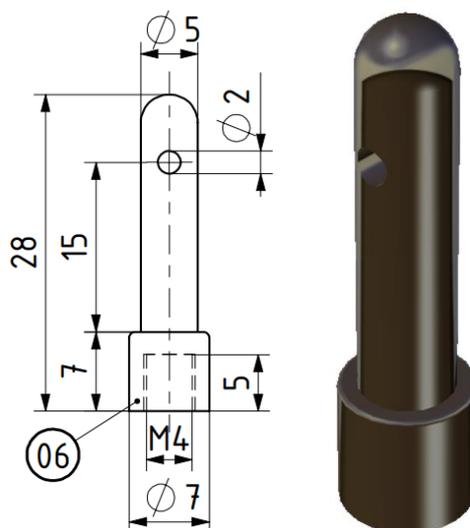


Ilustración 5.2-10 Plano y pieza, poste para barandilla

5.2.1.7 Poste de esquina para barandilla

El desarrollo de esta pieza es análogo a la anterior con la diferencia de la presencia de un agujero perpendicular al agujero superior, ver ilustración 5.2-11.

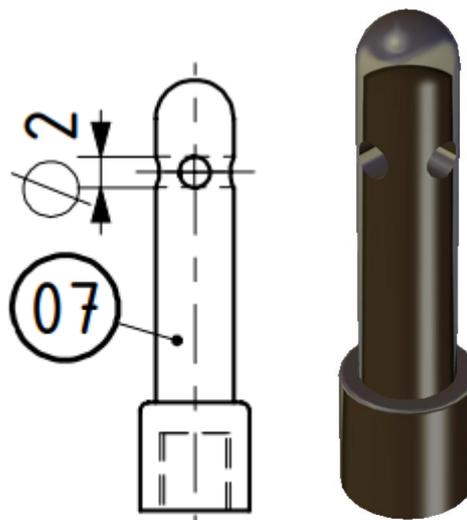


Ilustración 5.2-11 Plano y pieza, poste de esquina para barandilla

5.2.1.8 Barandilla corta

El modelado de esta pieza resulta sencillo realizando un *Sketch* circular, del diámetro indicado en la ilustración 5.2-12, junto con un *Pad* cuyo límite es la longitud de la varilla.

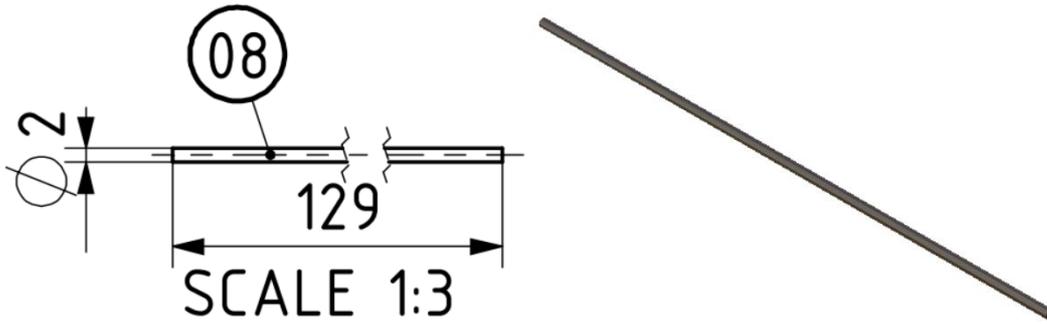


Ilustración 5.2-12 Plano y pieza, barandilla corta

5.2.1.9 Barandilla larga

Esta pieza es idéntica a la anterior con la excepción de su longitud, pasando de 129 a 166 milímetros.

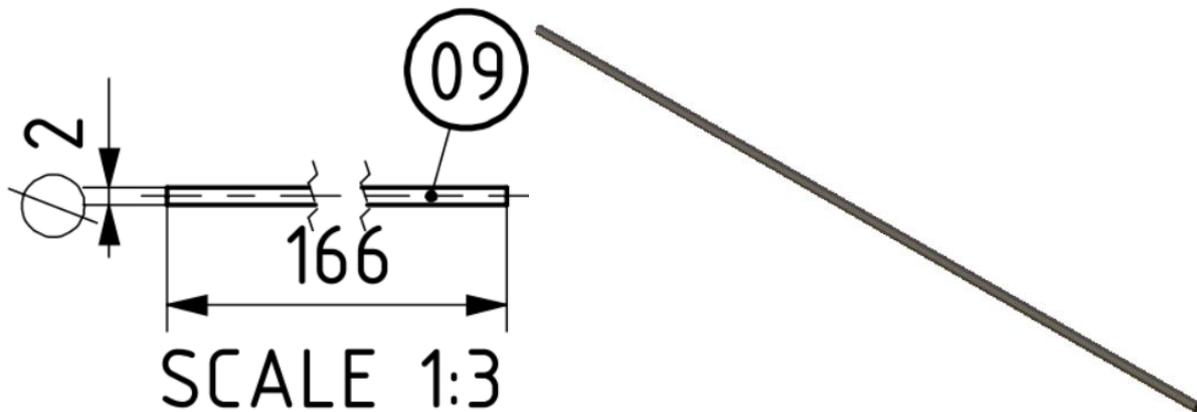


Ilustración 5.2-13 Plano y pieza, barandilla larga

5.2.1.10 Base para soporte de rodamiento

El modelo 3D de la placa sobre la que va instalada el soporte de los rodamientos se obtiene con un *Pad* del perfil de la ilustración 5.2-14, dos *Hole*, uno avellanado y otro simple, un *Mirror* realizado a estos dos agujeros con respecto al plano de simetría del perfil y, por último, se usa *Edgefillet* para redondear las aristas de la placa.

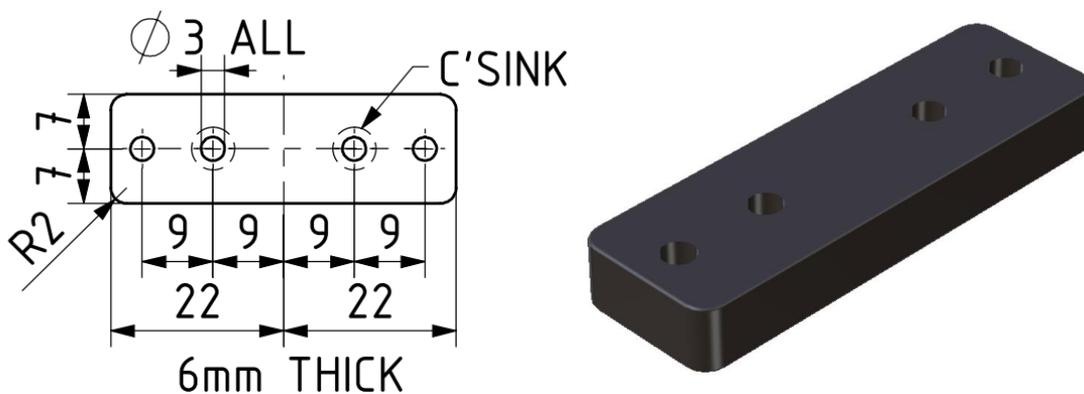


Ilustración 5.2-14 Plano y pieza, base para soporte de rodamiento

5.2.1.11 Soporte inferior de rodamiento

Como primera operación se reproduce el contorno de la pieza en un *Sketch*, esta figura plana se extruye 14 milímetros en la dirección normal al plano. Para crear la muesca circular en la que irá apoyado el rodamiento se usa la herramienta *Hole*, seleccionando un agujero pasante de radio 6mm. En cuanto a los dos agujeros M3 que sirven para unir el soporte inferior con el superior y así afianzar el rodamiento entre ellos, se realiza uno de ellos con la herramienta *Hole* de nuevo y se realiza un *Mirror* con el plano medio de la pieza que contiene el eje del agujero de 12 milímetros de radio.

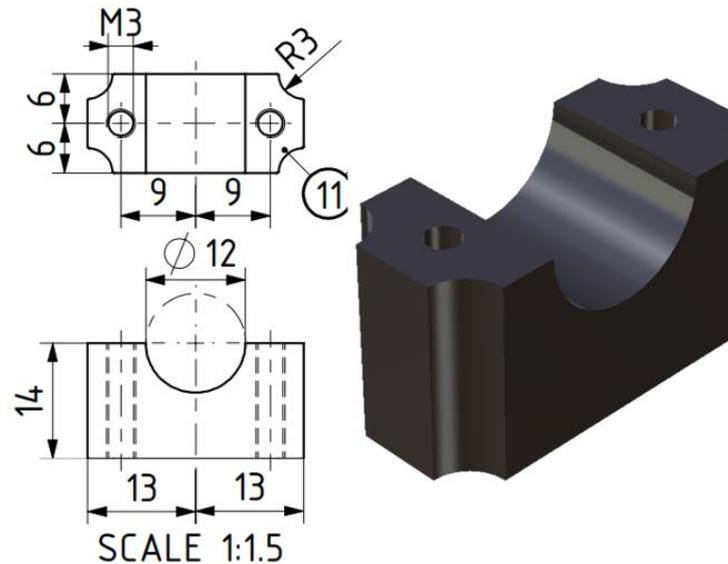


Ilustración 5.2-15 Plano y pieza, soporte inferior de rodamiento

5.2.1.12 Soporte superior de rodamiento

Los pasos seguidos en el modelado del soporte superior son análogos a los seguidos en el caso del soporte inferior con la única diferencia de un tercer agujero en la cara superior de la pieza. Este agujero, Drilled After Assembly (DAA), tiene que realizarse tras haber ensamblado el conjunto.

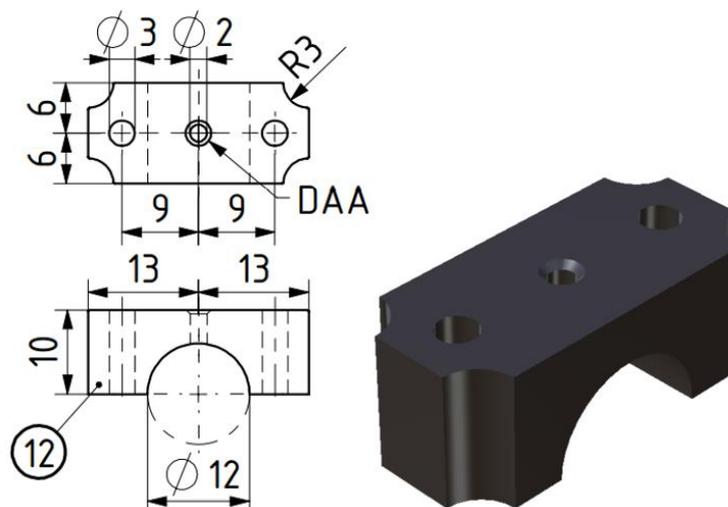


Ilustración 5.2-16 Plano y pieza, soporte superior de rodamiento

5.2.1.13 Rodamiento

El rodamiento se modela creando un cilindro macizo, siguiendo las dimensiones de los planos, con las herramientas *Sketch* y *Pad* para posteriormente realizar un escariado, ream (RM), de 8mm de diámetro y un taladrado en la pared lateral del cilindro.

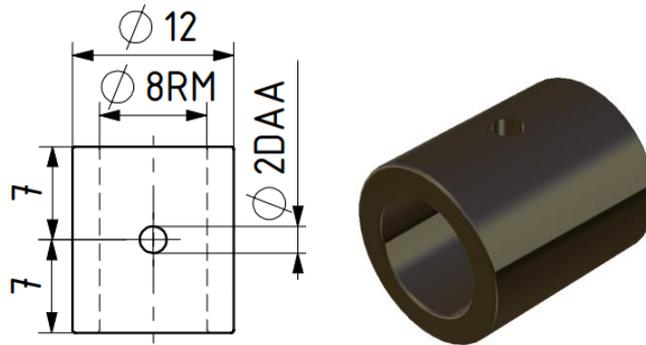


Ilustración 5.2-17 Plano y pieza, rodamiento

5.2.1.14 Placa de soporte para cilindro

Esta pieza de aluminio sirve de base para el cilindro, estando este atornillado a la placa. Para su modelado se emplea un *Sketch* con la forma en planta de la placa, una vez obtenido el perfil de la pieza se extruye mediante un *Pad*, consiguiendo un sólido. Para los taladros de la pieza, se hacen dos operaciones *Hole*, con las características indicadas en los planos, para posteriormente conseguir todos los taladros mediante la herramienta *Rectangular Pattern*.

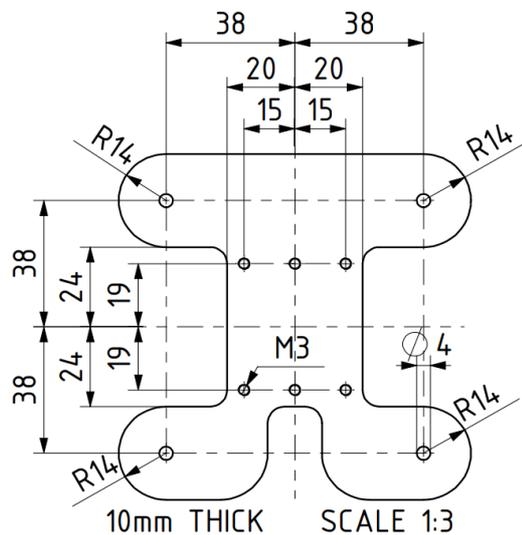


Ilustración 5.2-18 Plano, placa de soporte para cilindro

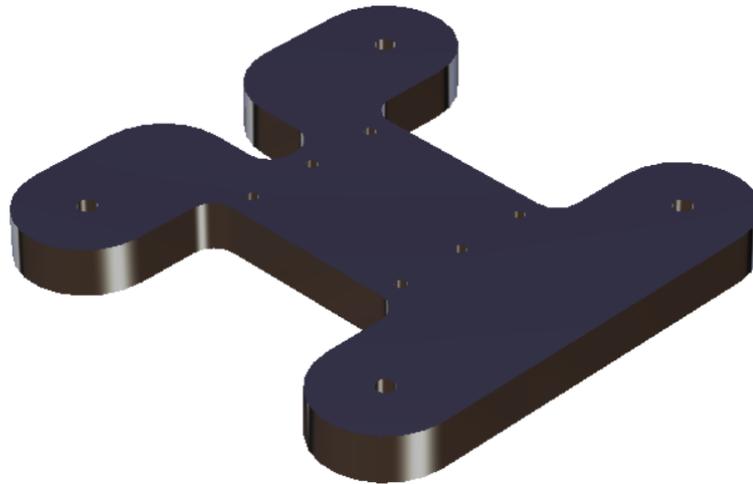


Ilustración 5.2-19 Pieza, placa de soporte para cilindro

5.2.2 Cilindro, pistón y volante de inercia

Una vez expuestos los elementos que sirven de base y soporte para el resto de componentes de la máquina se pasa a describir el volante de inercia y las piezas que forman el cilindro y el pistón.

5.2.2.1 Cilindro

El cilindro es el componente más complejo de esta máquina, para modelar esta pieza de latón se han distinguido cuatro partes.

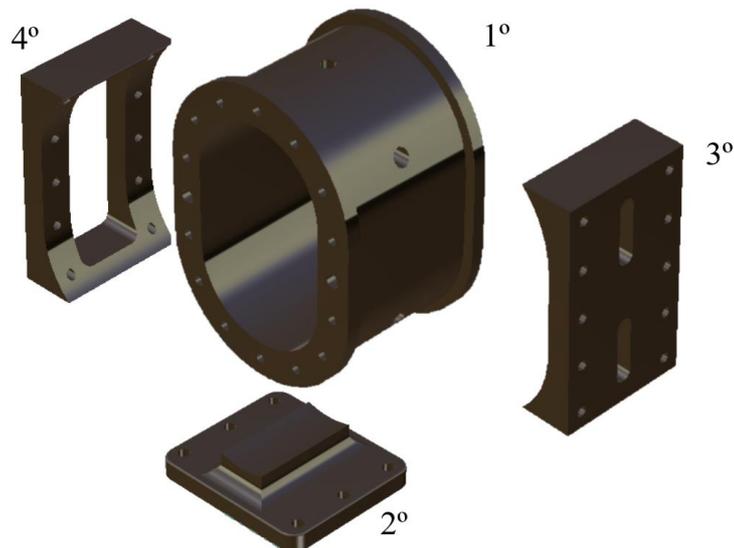


Ilustración 5.2-20 Separación en partes del cilindro

Para el modelado de la primera de ellas, correspondiente a la cámara central del cilindro, se lleva a cabo un *Multi-Pad*, obteniendo directamente la forma final de esta pieza. En cuanto a los agujeros, mediante la operación de *User Pattern*, *Hole* y *Mirror* se colocan y taladran todos los agujeros de la pieza que permitirán sellarla con la tapa frontal del cilindro. Por último, se realizan los taladros en la pared lateral que comunica con la válvula del cilindro.

La segunda parte en la que se ha dividido el cilindro para facilitar el modelado es la base sobre la que va apoyada la cámara. Para su modelado se usa de nuevo *Multi-Pad*, muy útil en piezas algo complejas, se extruye con esta herramienta el contorno frontal de la pieza, el cuál se obtiene ayudándose de la proyección de la primera parte ya modelada. Una vez obtenido el grueso de la pieza, se realiza un *Rib* de un segmento de arco de radio 4, seguido de un *Hole* que será objeto de un *Rectangular Pattern* para obtener los agujeros de la base.

El proceso de obtención de las partes tres y cuatro son similares con la salvedad de la diferencia en los perfiles usados en las operaciones de *Pocket* para el vaciado central de los sólidos. Se obtiene el perfil frontal de las partes interseccionando la cámara con un plano frontal, siguiendo los planos se cierra dicho perfil y se extruye mediante un *Pad*. Se procede al taladrado de los agujeros mediante las acciones *Hole* y *Rectangular Pattern*.

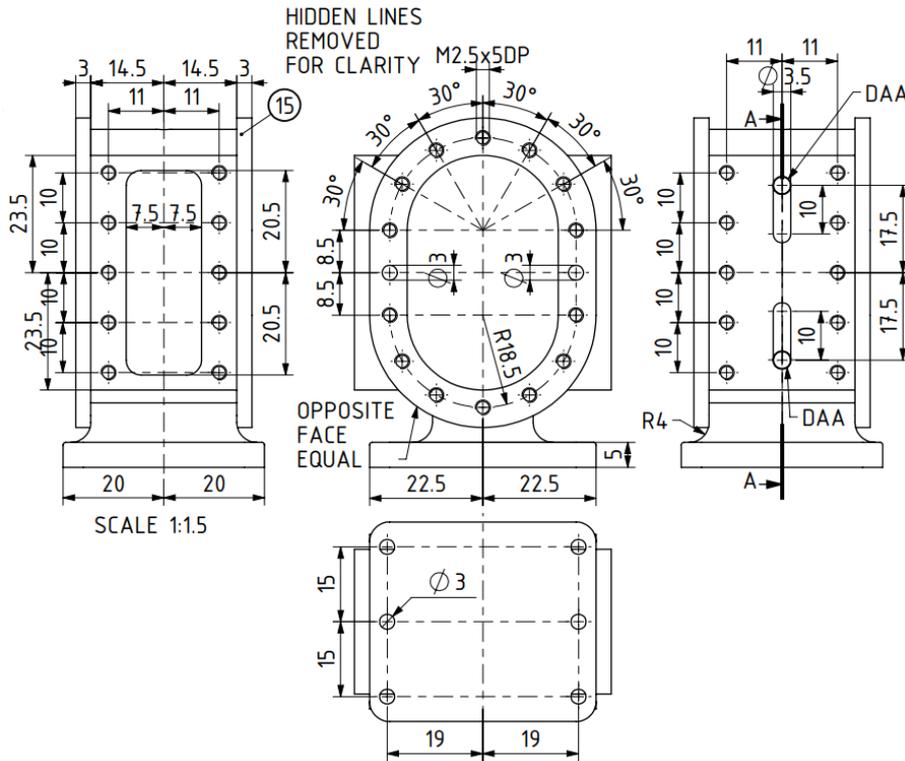


Ilustración 5.2-21 Plano, cilindro

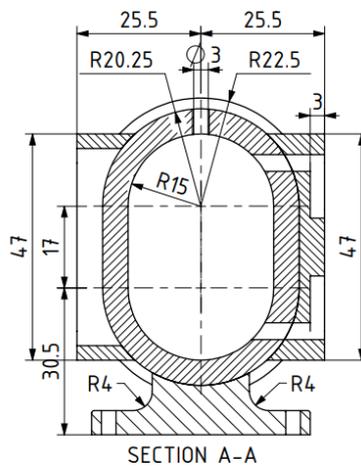


Ilustración 5.2-22 Plano, sección central cilindro

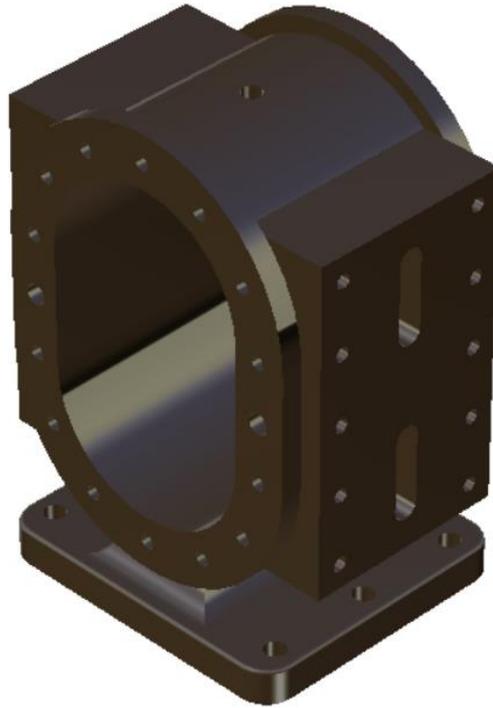


Ilustración 5.2-23 Pieza, cilindro

5.2.2.2 Tapa frontal del cilindro

Esta pieza es importante por las funciones que desempeña, sella el cilindro, confina el pistón y permite la transmisión del movimiento del pistón al exterior del cilindro mediante la apertura central. El material indicado para su fabricación es el latón.

Para su modelaje, primero se realiza un *Multipad* a un *Sketch* similar a la ilustración 5.2-24, obteniendo la tapa y el hueco central, y posteriormente, para las espigas que se introducen en el cilindro, un *Pad* en la superficie trasera de la tapa. Los agujeros laterales de la tapa, al no ser roscados y poder definirse de forma sencilla empleando la herramienta *Mirror* en un *Sketch*, se llevan a cabo mediante la operación *Pocket*. En cuanto al redondeo de las aristas, al igual que en el resto de las piezas, se emplea la herramienta *Edgefillet*.

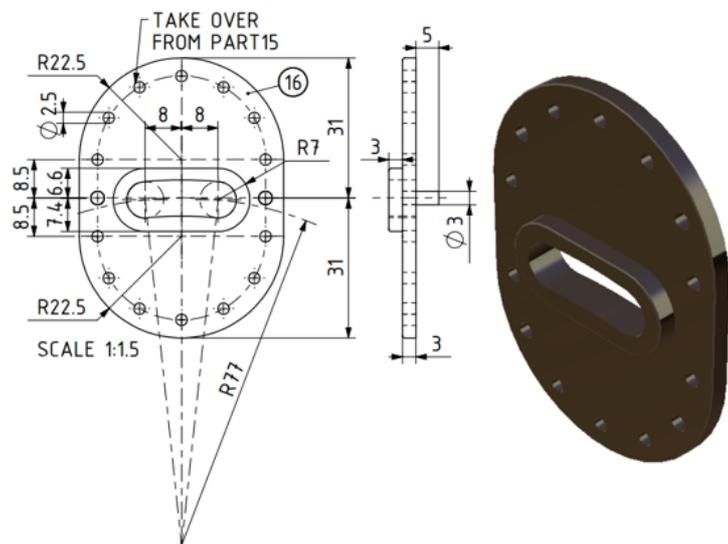


Ilustración 5.2-24 Plano y pieza, tapa frontal del cilindro

5.2.2.3 Tapa lateral del cilindro

Esta tapa de latón sella el lateral del cilindro en el cuál no está conectado el sistema de suministro de vapor. Se modela de forma sencilla con las herramientas *Pad*, *Hole* y *Rectangular Pattern*.

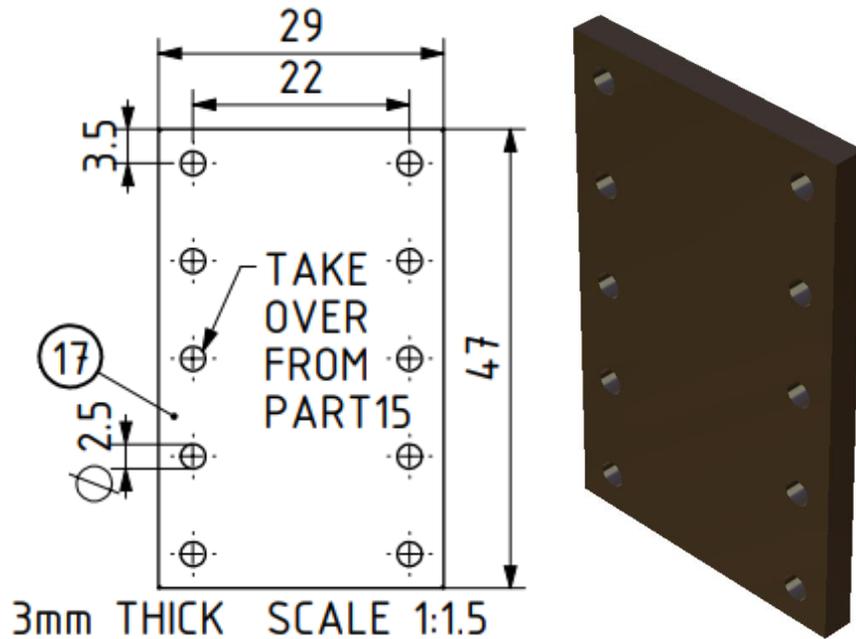


Ilustración 5.2-25 Plano, tapa lateral del cilindro

5.2.2.4 Engrasador

Para modelar esta pieza se ha representado el perfil de revolución en un *Sketch* para conseguir el sólido final con la operación *Shaft*. Las roscas M8, interna, y M3, externa, se obtienen usando la herramienta *Thread*.

La finalidad del engrasador, el cuál se sitúa en la parte superior del cilindro, es la de mantener una lubricación adecuada entre el pistón y las paredes internas del cilindro.

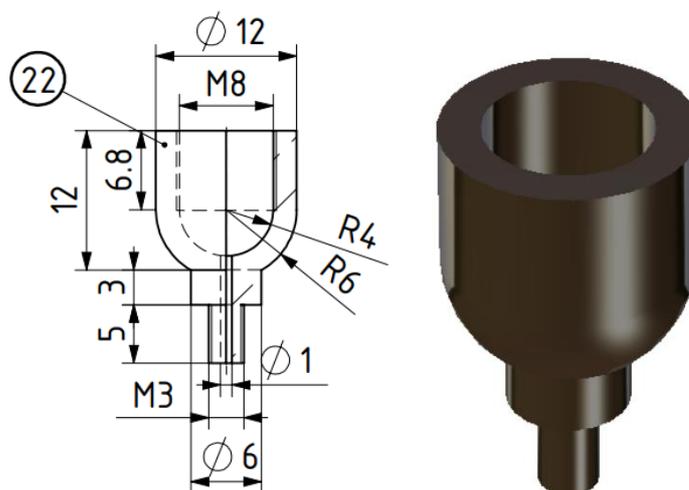


Ilustración 5.2-26 Plano y pieza, engrasador

5.2.2.5 Tapa del engrasador

El tapón roscado del engrasador visto en el punto anterior se obtiene mediante las operaciones *Shaft* y *Thread*. En cuanto al acabado de moleteado, se emplea la herramienta *Helix* del módulo de superficies de CATIA, concretamente en el módulo *Generative Shape Design*. Una vez conseguida la curva de hélice deseada se emplea la operación *Slot*, creando así una ranura en la cara lateral del tapón. Con la herramienta *Circular Pattern* se obtiene el acabado final, repitiendo esta ranura alrededor del tapón. Al igual que el propio engrasador, esta pieza es de latón.

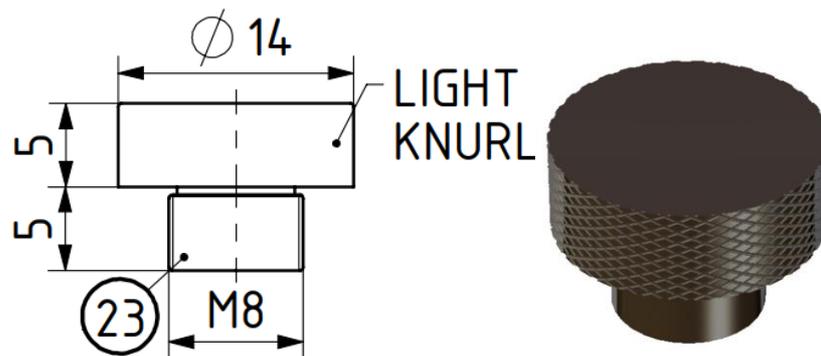


Ilustración 5.2-27 Plano y pieza, tapa del engrasador

5.2.2.6 Volante de inercia

El volante de inercia del motor Simpson & Shipton tiene un diámetro total de 180mm. La estrategia seguida para su modelaje ha sido la misma que para el resto de piezas, primero se crea el sólido en bruto para posteriormente restarle material y finalmente realizar los últimos detalles de la pieza.

El sólido en bruto se obtiene con un *Multipad*, para el diseño de los huecos del volante de inercia, se aprovecha su simetría de revolución, realizando un *Pocket* de un patrón y repitiéndolo hasta completar los 360 grados del volante con la herramienta *Circular Pattern*. En cuanto a los dos taladros M3 que se emplean para afianzar el volante con el extremo del cigüeñal, se llevan a cabo mediante la operación *Hole*.

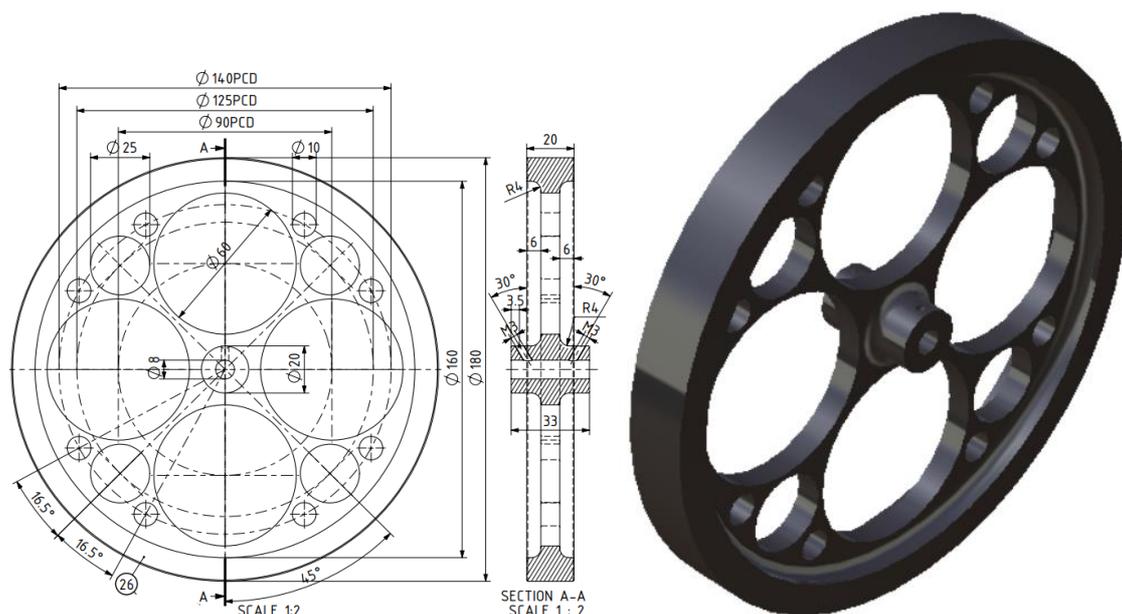


Ilustración 5.2-28 Plano y pieza, volante de inercia

5.2.2.7 Pistón

El pistón es una pieza sensible ya que debe ajustarse perfectamente al cilindro para obtener un buen rendimiento de la máquina, para evitar cambios de volumen debido a los gradientes de temperatura se indica acero inoxidable como material para su fabricación. Para prevenir fugas en las caras frontales, se hace una ranura circular en la que se inserta un anillo de grafito.

En cuanto a su modelaje, se realiza de forma sencilla con las operaciones *Multipad* y *Hole*.

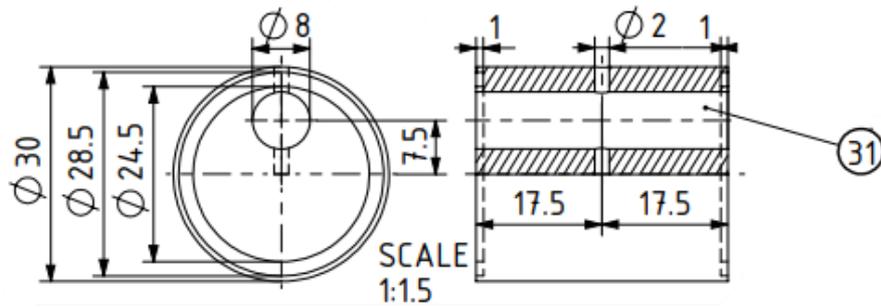


Ilustración 5.2-29 Plano, pistón

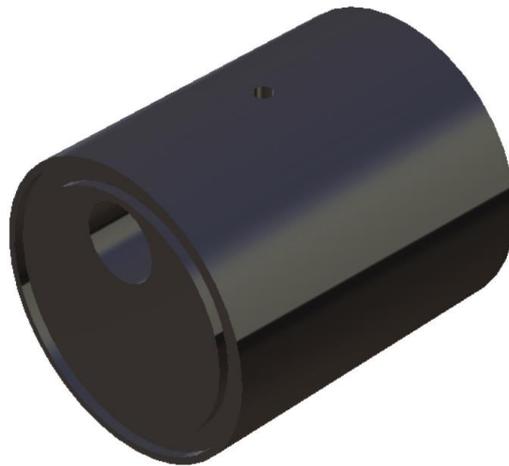


Ilustración 5.2-30 Pieza, pistón

5.2.2.8 Anillo sellador del pistón

Los anillos de grafito se insertan en los extremos del pistón para sellar el contacto de este con las paredes frontales del cilindro.

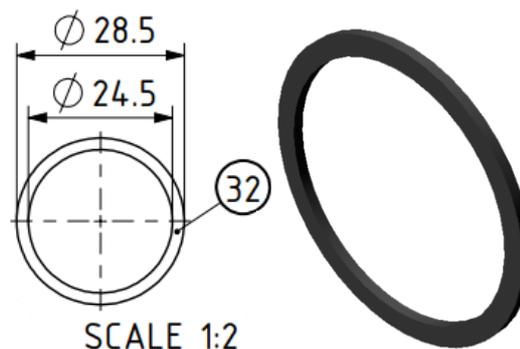


Ilustración 5.2-31 Plano y pieza, anillo sellador del pistón

5.2.2.9 Eje del pistón

El eje del pistón es elemento que transmite el movimiento del interior del cilindro al resto de la máquina, se introduce 7.5mm desplazado del centro del pistón y atraviesa el cilindro completo pasando por las ranuras de las tapas frontales. Para sujetar eje y pistón, además de usar un pasador, se realiza un moleteado en la zona central de la misma forma que se realiza para el tapón del engrasador.

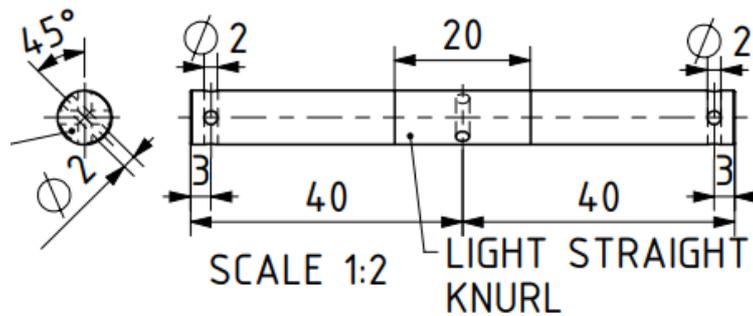


Ilustración 5.2-32 Plano, eje del pistón



Ilustración 5.2-33 Pieza, eje del pistón

5.2.3 Válvula y bloque de suministro

En este apartado se exponen las piezas que forman la válvula corredera de la máquina y el bloque de suministro, que está compuesto a su vez por las piezas de la válvula de parada y del tubo de suministro de vapor.

5.2.3.1 Cuerpo de la válvula

Esta pieza forma parte de la válvula que controla el paso de vapor al interior del cilindro, en su interior se encuentra la válvula corredera, mientras que las caras frontales se comunican con el cilindro y el sistema de suministro de vapor. Los cuatro agujeros circulares presentes en los laterales de la pieza tienen como función la salida del vapor de la máquina.

Para modelar el cuerpo de la válvula, se obtiene primero el bloque macizo con una operación *Multipad* y posteriormente se vacía y se realizan los diversos taladros con las herramientas de *Hole*, *Rectangular Pattern* y *Circular Pattern*.

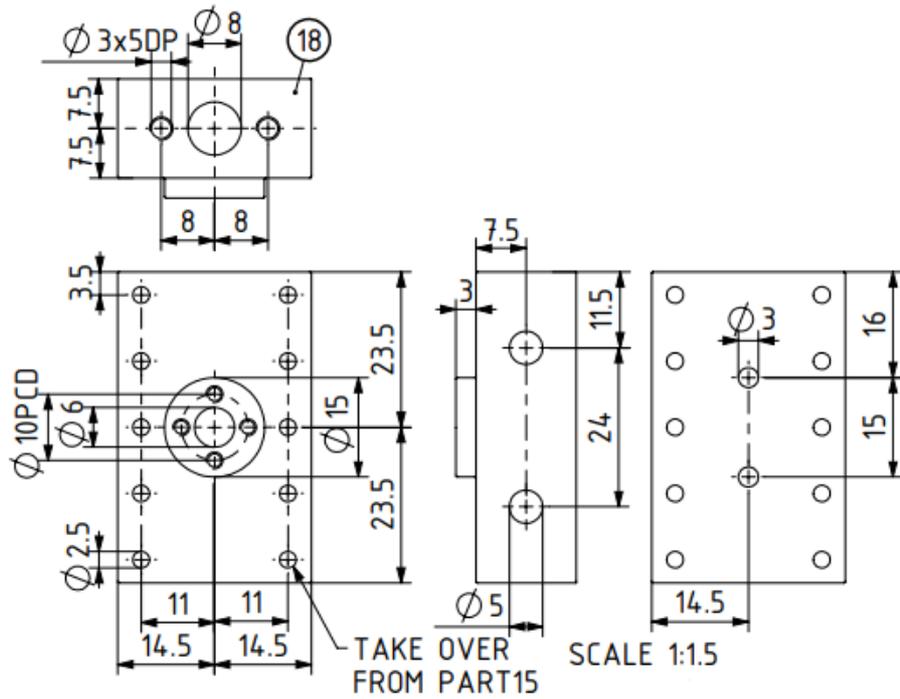


Ilustración 5.2-34 Plano, cuerpo de la válvula



Ilustración 5.2-35 Pieza, cuerpo de la válvula

5.2.3.2 Adaptador cuerpo-guía válvula

Este elemento de latón sirve de unión entre la guía del vástago de la válvula y el cuerpo principal del sistema de válvula. Para modelarlo se emplean las herramientas básicas de *Pad* y *Hole*.

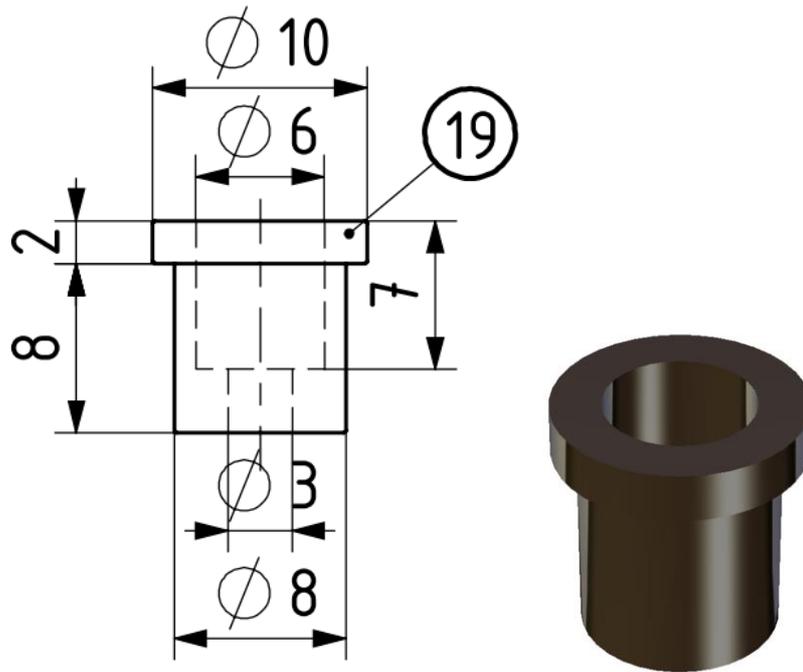


Ilustración 5.2-36 Plano y pieza, adaptador cuerpo-pasador válvula

5.2.3.3 Guía del vástago de la válvula

Esta pieza se sujeta al cuerpo de la válvula mediante dos tornillos que se insertan en los agujeros laterales de la cara superior, el diámetro del orificio central realizado con la operación *Hole*, al igual que el resto de agujeros, se ajusta al diámetro del vástago de la válvula. En cuanto al material, de nuevo se recomienda su fabricación en latón.

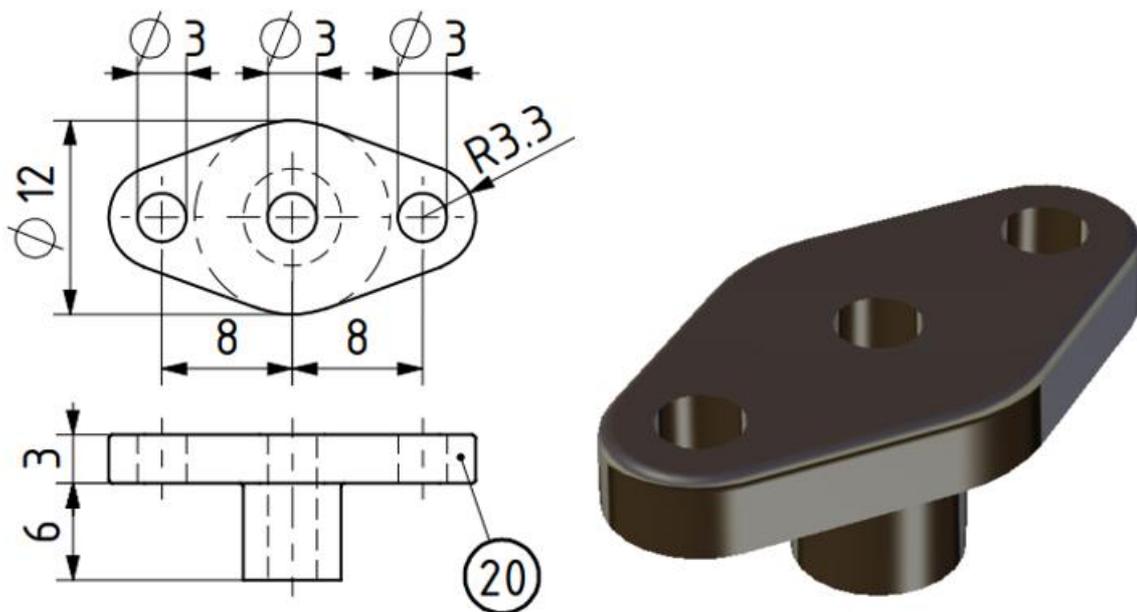


Ilustración 5.2-37 Plano y pieza, guía del vástago de la válvula

5.2.3.4 Aro sellador de la guía de la válvula

Este pequeño aro de teflón, que se inserta en el adaptador visto anteriormente, previene las posibles fugas por el movimiento del vástago en el cuerpo de la válvula.

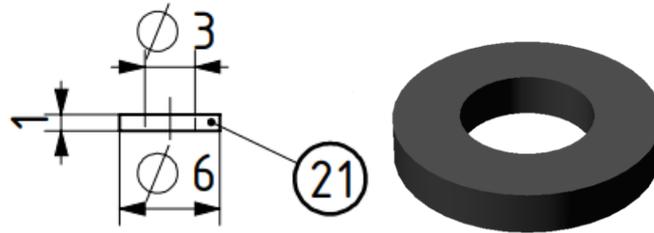


Ilustración 5.2-38 Plano y pieza, aro sellador de la guía de la válvula

5.2.3.5 Émbolo de la válvula

Para modelar el émbolo se llevan a cabo las operaciones *Shaft* y *Hole*. El diámetro de 8 milímetros coincide con el de la ranura interior del cuerpo de la válvula, en cuanto al taladro M3, se realiza para roscar posteriormente el vástago de la válvula.

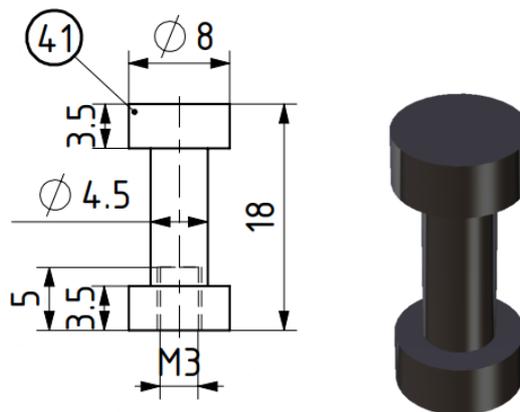


Ilustración 5.2-39 Plano y pieza, émbolo de la válvula

5.2.3.6 Tapón del cuerpo de la válvula

El tapón se introduce por apriete (PF, Press Fit) en la parte inferior del cuerpo de la válvula. La recomendación de material para este componente es el latón, al igual que el cuerpo de válvula.

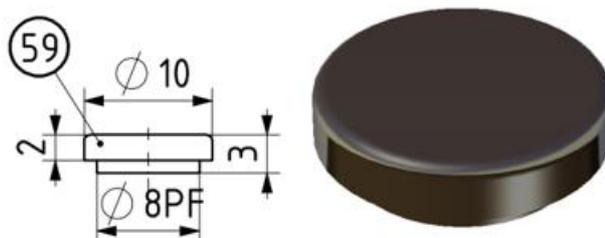


Ilustración 5.2-40 Plano y pieza, tapón del cuerpo de la válvula

5.2.3.7 Cuerpo de la válvula de parada

En este componente, que forma parte del bloque de suministro, pasa el vapor antes de llegar a la válvula de la máquina. En su interior y gracias al resto de piezas que forman la válvula de parada puede regularse el caudal de vapor que seguidamente pasa a la válvula corredera.

Para su modelaje se emplean varios *Shaft* dada la simetría de revolución de esta pieza. En cuanto a los taladros, se emplea, como hasta ahora, las herramientas *Hole* y *Circular Pattern*.

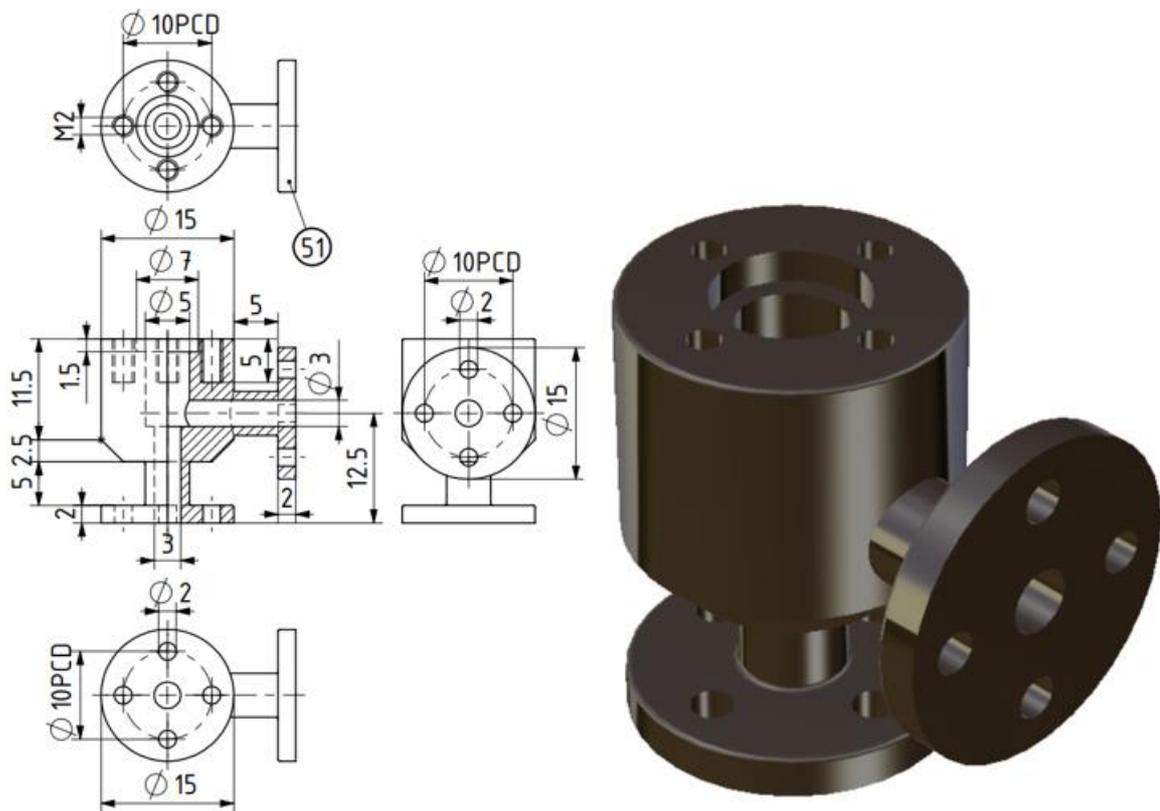


Ilustración 5.2-41 Plano y pieza, cuerpo de válvula de parada

5.2.3.8 Tapa superior de la válvula de parada

Esta tapa sella la parte superior del cuerpo de válvula, una vez posicionado la junta de teflón (5.2.3.10) en el interior del cuerpo, permitiendo el movimiento del husillo.

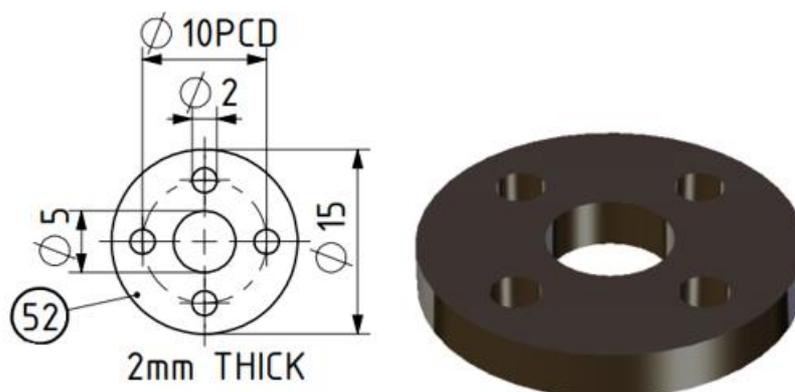


Ilustración 5.2-42 Plano y pieza, tapa superior de válvula de parada

5.2.3.9 Husillo de la válvula de parada

La parte inferior del husillo, o tornillo de potencia, que se encuentra en el interior del cuerpo de la válvula permite regular, mediante su posición, el caudal de vapor que pasa al resto del motor. Para modelarlo se ha empleado la operación *Multipad* junto con *Thread* para lograr las roscas M2, M3 y M4 que permiten el montaje con el resto de componentes de la válvula de parada.

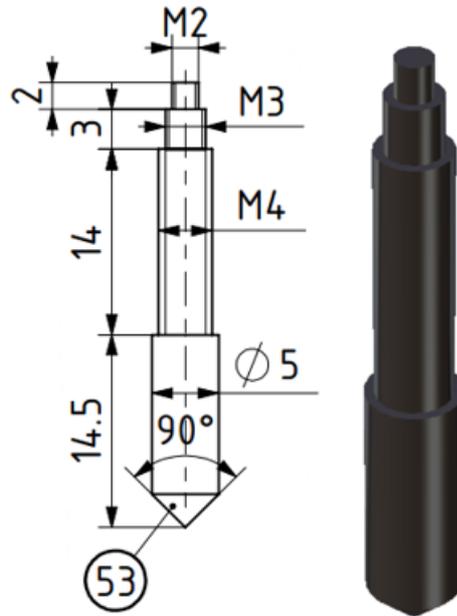


Ilustración 5.2-43 Plano y pieza, husillo de la válvula de parada

5.2.3.10 Tornillo espaciador del husillo

Los tornillos, además de unir la tapa superior con el cuerpo de la válvula de parada, separan la tuerca del tornillo de potencia de la tapa superior. Se modelan de la misma forma que el husillo, mediante un *Multipad* y *Thread*.

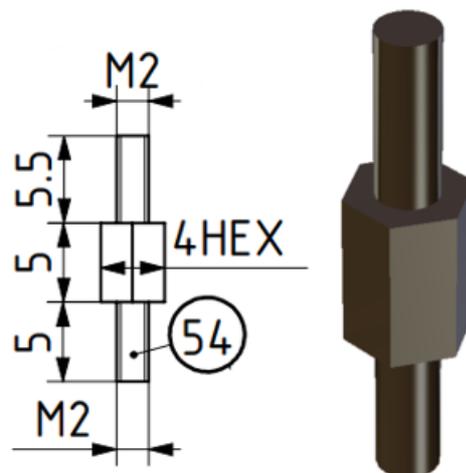


Ilustración 5.2-44 Plano y pieza, tornillo espaciador del husillo

5.2.3.11 Sellador de la válvula de parada

Este anillo sellador de teflón se inserta, como se ha comentado anteriormente, en el aparte superior del cuerpo de la válvula de parada, fijando su posición mediante la tapa superior.

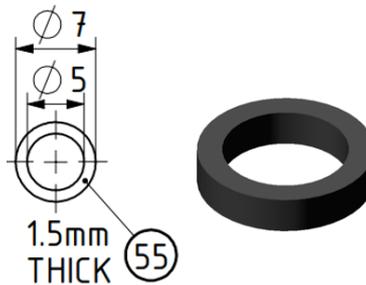


Ilustración 5.2-45 Plano y pieza, sellador de la válvula de parada

5.2.3.12 Tuerca del husillo de la válvula de parada

Mediante la rosca central, esta pieza, llamada también tuerca de tornillo de potencia, regula los grados de libertad de movimiento del husillo, permitiendo únicamente la traslación en una dirección. En cuanto a su modelaje en el programa CATIA V5, el proceso seguido es el mismo que el de muchas piezas vistas hasta ahora.

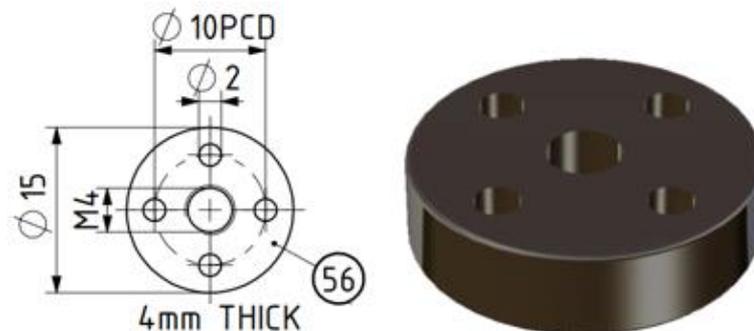


Ilustración 5.2-46 Plano y pieza, tuerca del husillo de la válvula de parada

5.2.3.13 Rueda manual de la válvula de parada

A través del giro de este componente se controla la posición del tornillo de potencia dentro del cuerpo de la válvula.

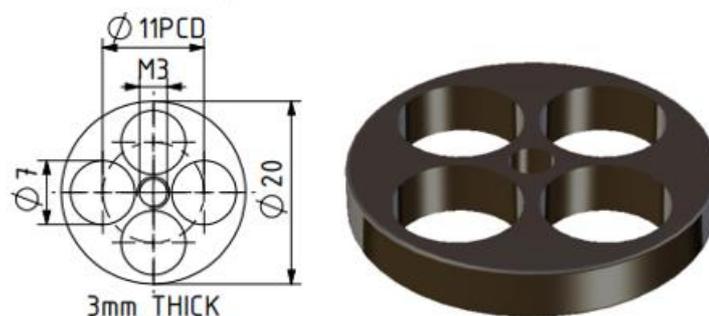


Ilustración 5.2-47 Plano y pieza, rueda manual de la válvula de parada

5.2.3.14 Tubo de suministro de vapor

Para modelar el tubo de suministro se divide el componente en dos, el adaptador superior y el propio tubo de cobre. Las herramientas que se usan para obtener el adaptador de latón son las mismas que las empleadas en todas las piezas de su tipo. En cuanto al tubo de suministro, se llevan a cabo dos *Sketch*, en el primero se esboza la sección del tubo y en el segundo la guía que ha de seguir. Una vez se tiene la sección y su guía se realiza un *Rib*, obteniendo el resultado final.

La función de esta pieza es la de llevar el caudal de vapor desde el bloque conector de suministro hasta la válvula de parada.

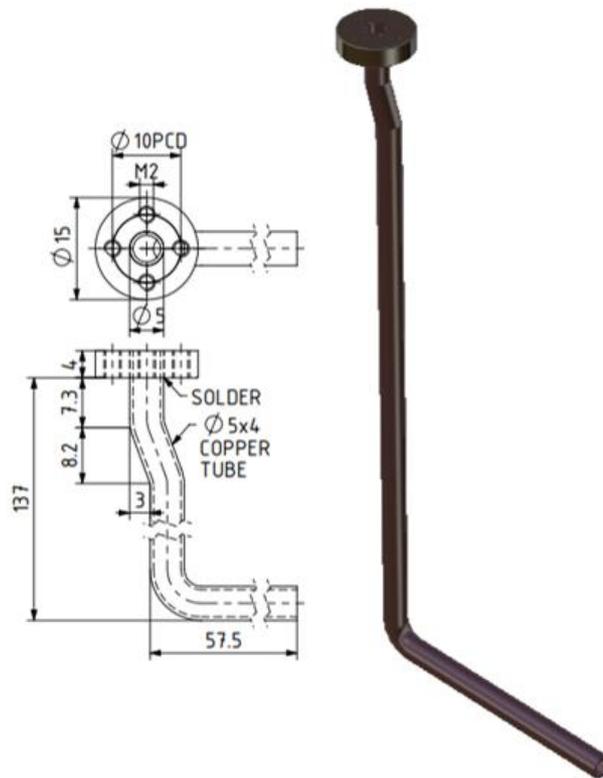


Ilustración 5.2-48 Tubo de suministro de vapor

5.2.3.15 Bloque conector de suministro de vapor

El bloque de suministro de vapor sirve de nexo entre la máquina y una fuente externa de vapor, como se puede apreciar, el diámetro del agujero posterior es el mismo que el del tubo de suministro visto en el punto anterior. Los cuatro taladros presentes en las esquinas de la pieza se emplean para afianzar este componente a la base de madera.

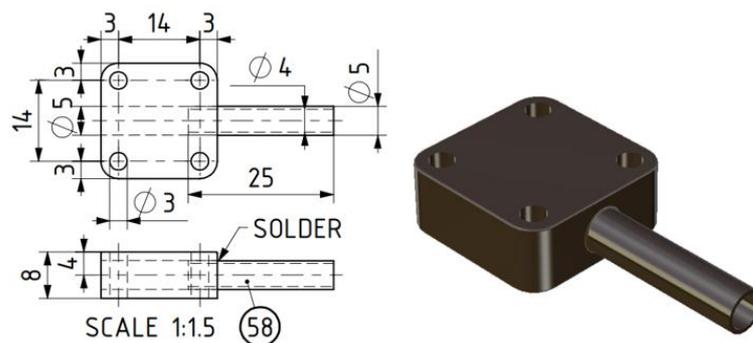


Ilustración 5.2-49 Plano y pieza, bloque conector de suministro de vapor

5.2.4 Bielas, manivelas y espaciadores

Para terminar el estudio de los componentes de la máquina se procede a exponer las piezas cuya función es la de transmitir el movimiento entre los elementos vistos hasta ahora.

5.2.4.1 Extremo del cigüeñal del volante de inercia

En esta barra de acero inoxidable de 8 milímetros de diámetro se monta el volante de inercia para unirlo al cigüeñal de la máquina. En su modelaje se emplean las herramientas *Pad* y *Hole*.

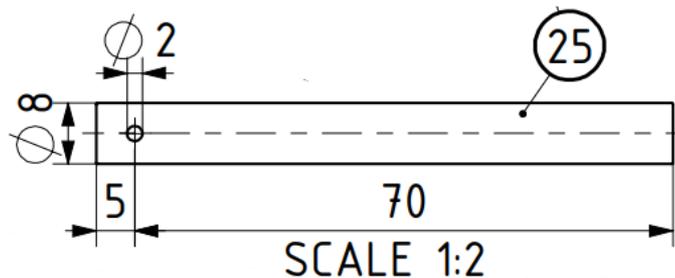


Ilustración 5.2-50 Plano, extremo del cigüeñal del volante de inercia



Ilustración 5.2-51 Pieza, extremo del cigüeñal del volante de inercia

5.2.4.2 Manivela del extremo delantero del cigüeñal

Siguiendo los planos la manivela se divide en dos cuerpos. El primero se corresponde con el cuerpo de la manivela, para modelarlo se lleva a cabo un *Multipad* al *Sketch* con la esbozo frontal que aparece en los planos de la ilustración 5.2-52. Para la barra de la manivela, el segundo cuerpo, se usa una proyección de la parte deseada del primer cuerpo y se extruye con la operación *Pad*. Para terminar se realizan los taladros y se asigna el material, acero inoxidable para el brazo de la manivela y acero dulce para el cuerpo.

En cuanto a su función y ubicación, resulta de mayor interés observar esta pieza directamente en el ensamblaje final. Ver ilustración 6.3-7.

Este procedimiento se aplicará para el resto de manivelas (piezas 28 y 29) por lo que se obvia su explicación en los correspondientes apartados.

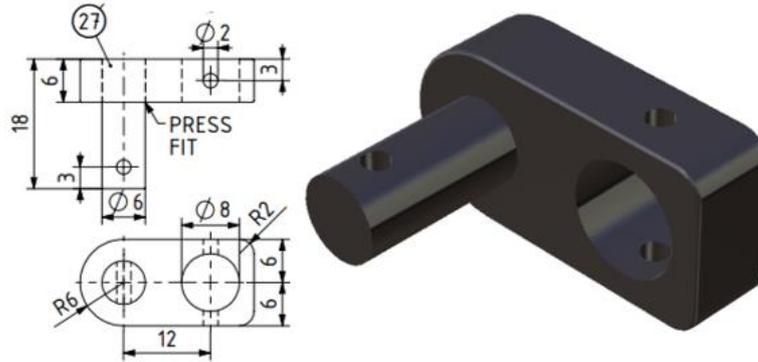


Ilustración 5.2-52 Plano y pieza, manivela del extremo delantero del cigüeñal

5.2.4.3 Manivela del extremo del cigüeñal del volante de inercia

El modelaje y función de la pieza queda expuesto en el apartado 5.2.4.2 del presente documento.

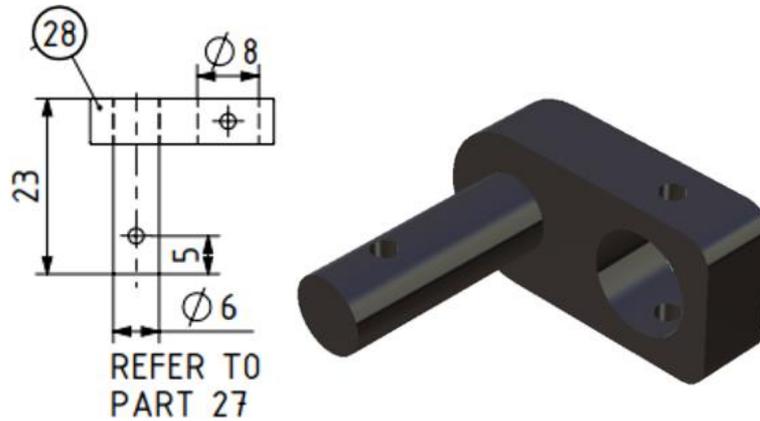


Ilustración 5.2-53 Plano y pieza, manivela del extremo del cigüeñal del volante de inercia

5.2.4.4 Manivela del extremo del eje del pistón

El modelaje y función de la pieza queda expuesto en el apartado 5.2.4.2 del presente documento.

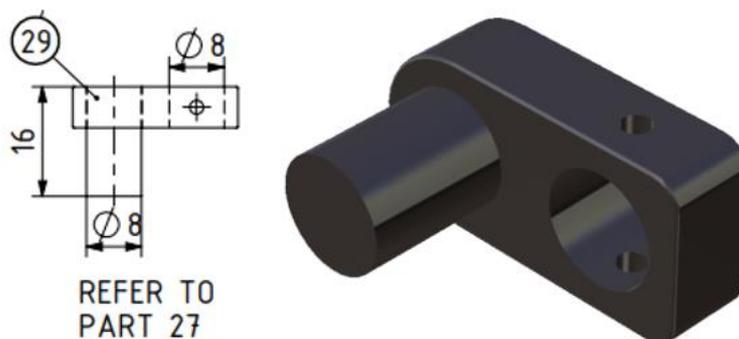


Ilustración 5.2-54 Plano y pieza, manivela del extremo del eje del pistón

5.2.4.5 Extremo delantero del cigüeñal

Este tramo del cigüeñal se sitúa debajo de la placa de soporte del cilindro, se soporta en dos de los cuatro rodamientos de la máquina y en él se instala la polea excéntrica, la manivela del extremo delantero del cigüeñal y la manivela de extremo del cigüeñal del volante de inercia. Ver ilustración 6.2-9

Para su conformado se emplean las mismas operaciones y material que el eje del pistón visto anteriormente (apartado 5.2.2.9).

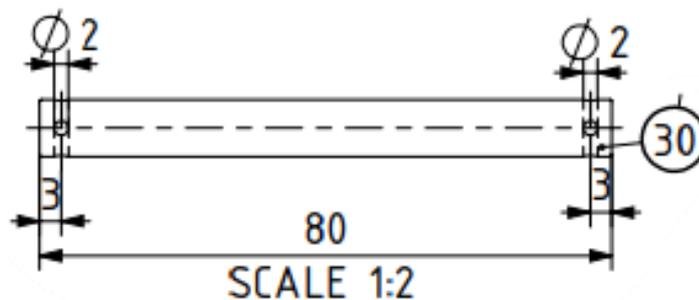


Ilustración 5.2-55 Plano, extremo delantero del cigüeñal

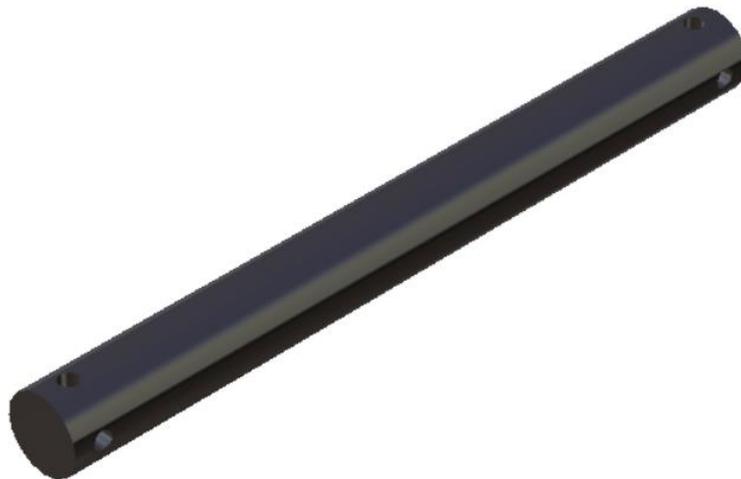


Ilustración 5.2-56 Pieza, extremo delantero del cigüeñal

5.2.4.6 Biela interior

Se le asigna a la pieza el nombre de biela interior ya que es la más cercana al pistón, instalándose directamente en el eje del mismo. Su otro extremo se encuentra unido al extremo delantero del cigüeñal, visto en el apartado previo. La función de la biela es la de transmitir el movimiento entre sus dos extremos.

En su modelado se emplean dos *PartBody* distintos, uno correspondiente a la biela y otro a los cojinetes o rodamientos.

Para la biela se realiza un primer *Pad* para obtener el brazo de la biela y otro para obtener una de las cabezas, la otra se obtiene llevando a cabo una operación *Mirror*. Para terminar la biela se hace uso de la herramienta *Edgefillet*, consiguiendo la unión redondeada del brazo y las cabezas.

Para los rodamientos se proyecta el agujero de la cabeza de la biela en un *Sketch* y se realiza otra circunferencia concéntrica a la obtenida con el radio indicado en la ilustración 5.2-57. Posteriormente se realiza un *Pad* al perfil obtenido y se le asigna el material de bronce.

5.2.4.8 Biela exterior

La metodología empleada para modelar las bielas exteriores es análoga a las bielas interiores con la única diferencia del cambio en las medidas de los rodamientos.

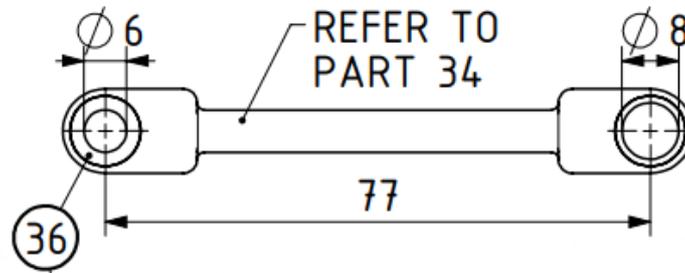


Ilustración 5.2-60 Plano, biela exterior



Ilustración 5.2-61 Pieza, biela exterior

5.2.4.9 Espaciador manivela-biela pistón

Este componente se instala entre la manivela del extremo del eje del pistón y la biela interior evitando el contacto entre estas dos piezas y eliminando posibles holguras de la biela.

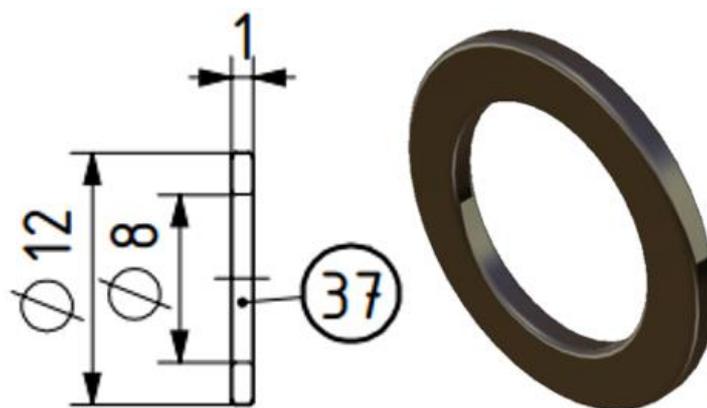


Ilustración 5.2-62 Plano y pieza, espaciador manivela-biela pistón

5.2.4.10 Espaciador del cigüeñal

Estos espaciadores se colocan en la manivela del extremo delantero del cigüeñal y en la manivela del extremo del cigüeñal del volante de inercia, estando en contacto en ambos casos con las bielas exteriores. Ver ilustración 6.3-7.

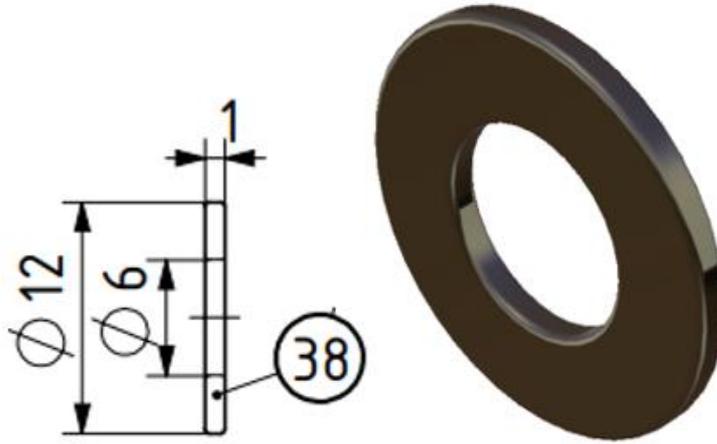


Ilustración 5.2-63 Plano y pieza, espaciador del cigüeñal

5.2.4.11 Anillo retenedor de biela

Esta pieza fija la posición de la biela exterior en la manivela del extremo delantero del cigüeñal.

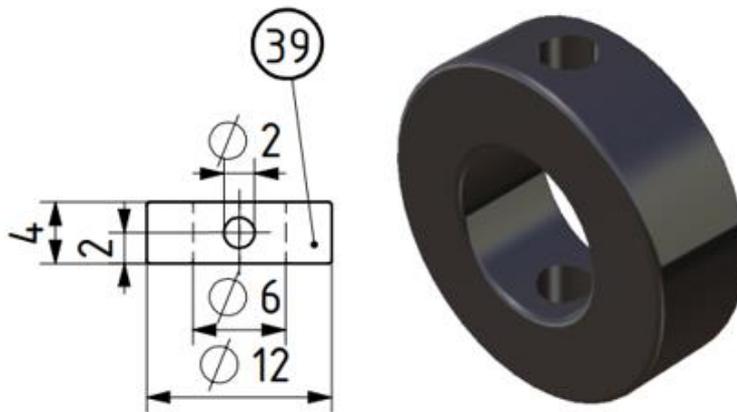


Ilustración 5.2-64 Plano y pieza, anillo retenedor de biela

5.2.4.12 Manivela de unión volante de inercia-cigüeñal

El propósito de la manivela es unir mecánicamente el tramo del cigüeñal del volante de inercia con el del resto de la máquina. Por los dos taladros de 2 milímetros de diámetro que presenta se introducen pasadores afianzando la manivela con los dos brazos del cigüeñal.

Para modelar este componente se emplean las mismas herramientas que en el resto de manivelas, por lo que se obvia su explicación.

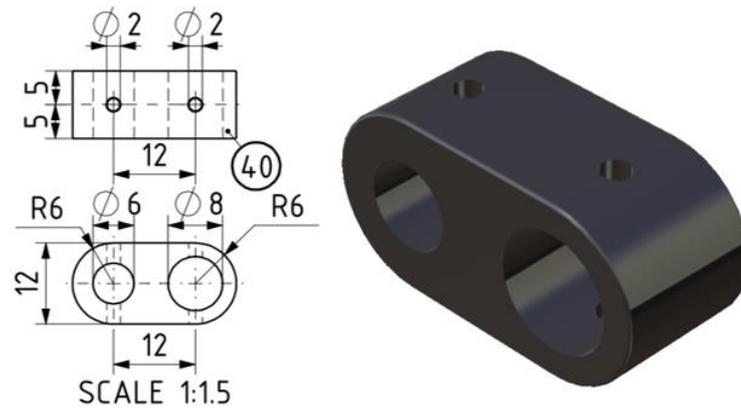


Ilustración 5.2-65 Plano y pieza, manivela de unión volante de inercia-cigüeñal

5.2.4.13 Soporte de manivela de la válvula

Este componente se fija al cuerpo de la válvula mediante dos tornillos M2.5 y sirve de soporte para el eje de la manivela que acciona el movimiento de la válvula.

Para su modelaje en CATIA, se realiza uno de los cilindros huecos con la herramienta *Multipad*, empleando una proyección del mismo en un *Sketch* referido a un plano perpendicular a su eje, se obtiene la curva de la placa de unión. Una vez se tiene el perfil de la placa, se lleva a cabo un *Pad* de 29mm de longitud seguido de un *Mirror* al cilindro hueco para obtener su simétrico. Para terminar la pieza se asigna el material *Steel*.

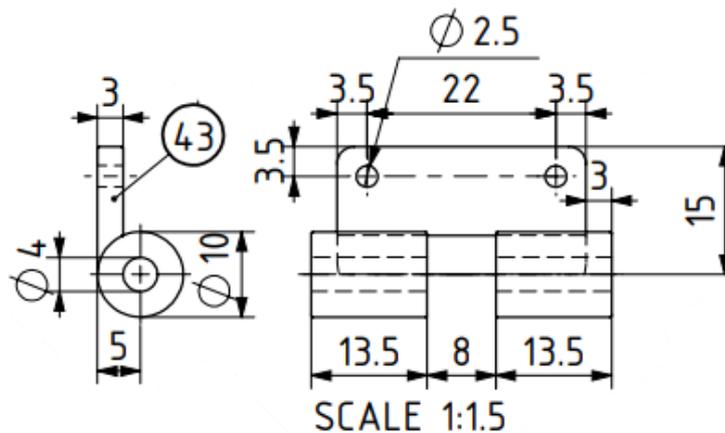


Ilustración 5.2-66 Plano, soporte de manivela de la válvula

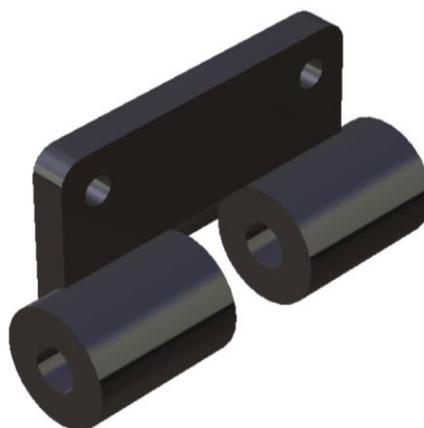


Ilustración 5.2-67 Pieza, soporte de manivela de la válvula

5.2.4.14 Eje de manivela de la válvula

Este eje de acero se introduce en el soporte visto en el apartado anterior, en los tres taladros presentes en la pieza se instalan los brazos de las bielas de la manivela que se ven a continuación.

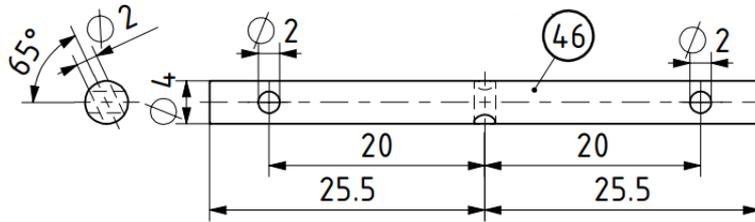


Ilustración 5.2-68 Plano, eje de la manivela de la válvula



Ilustración 5.2-69 Pieza, eje de la manivela de la válvula

5.2.4.15 Brazo central de biela de la válvula

Instalado en el centro del eje, es el encargado de transmitir el movimiento de la biela excéntrica al eje de la manivela de la válvula, transformando el movimiento de traslación en un movimiento rotatorio. Para fijar esta pieza con el brazo de la biela excéntrica se inserta en el agujero de 1.5mm de radio el pasador de acero de la biela excéntrica.

La explicación del proceso llevado a cabo en el programa de diseño asistido por ordenador CATIA V5 se omite debido a su similitud con el proceso visto en el conformado de las manivelas de la máquina.

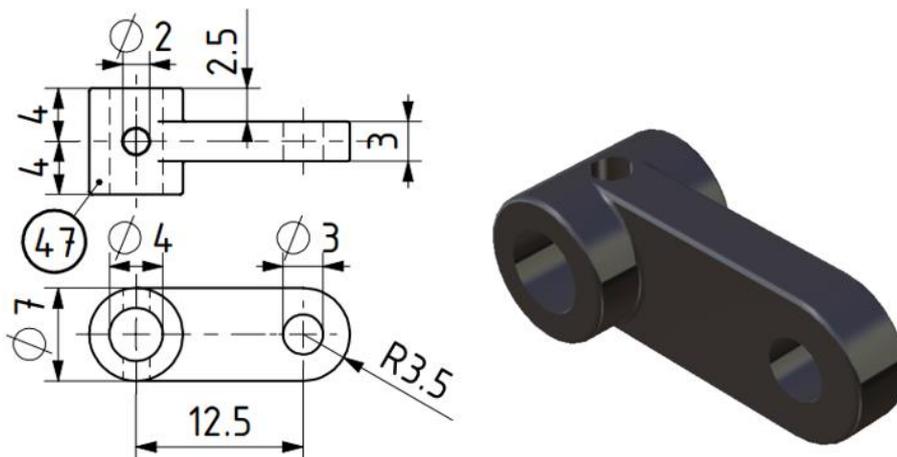


Ilustración 5.2-70 Plano y pieza, brazo central de biela de la válvula

5.2.4.16 Brazo exterior de biela de la válvula

En este caso, la función de este componente de acero dulce es el contrario que el brazo central, transmite el movimiento del eje de la manivela de la válvula a las bielas laterales, transformando el movimiento de rotación en un movimiento de traslación.

De nuevo, se omite la explicación de su modelaje por ser prácticamente idéntico al modelaje de otros componentes.

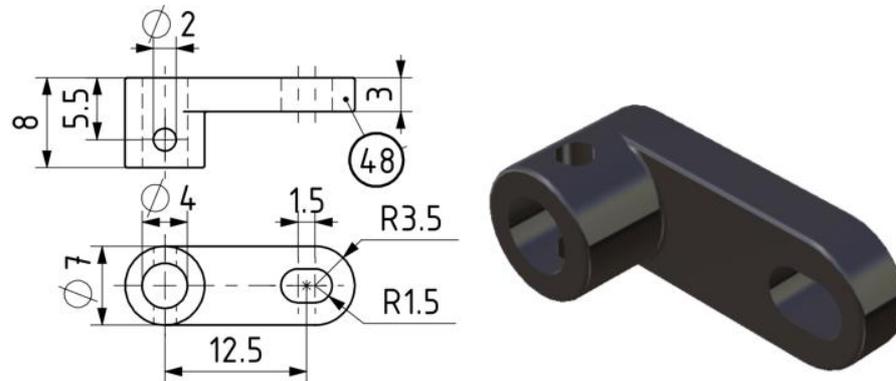


Ilustración 5.2-71 Plano y pieza, brazo exterior de biela de la válvula

5.2.4.17 Biela lateral de la válvula

Las bielas laterales, conformadas con acero dulce, se encuentran unidas en su extremo inferior a los brazos exteriores, mientras que su extremo roscado se inserta en la vigueta cruzada de la válvula. Son las encargadas de transmitir el movimiento de traslación hasta la vigueta cruzada. Para poder ajustar su ensamblaje, se rosca una longitud superior a la necesaria, permitiendo así un cierto juego con las tuercas en el montaje.

En cuanto al proceso seguido para modelarla, se realizan dos *Partbody*, uno correspondiente a la biela en si y otro correspondiente al pasador de acero inoxidable.

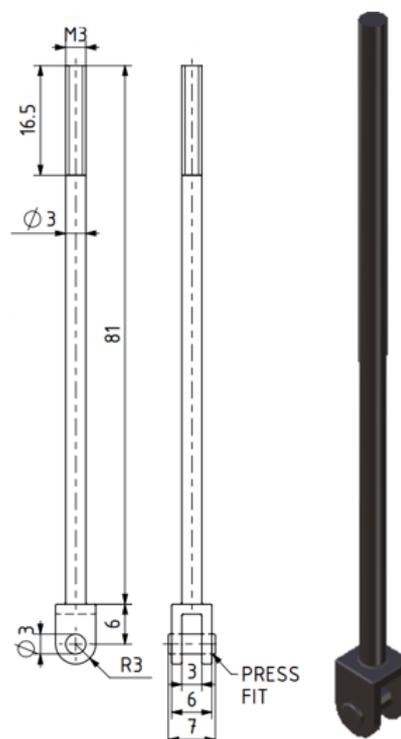


Ilustración 5.2-72 Plano y pieza, biela lateral de la válvula

5.2.4.18 Vástago de la válvula

El vástago central de la válvula se une directamente con el émbolo de la válvula en su extremo roscado de 5mm. El extremo de 8 mm se rosca en la vigueta cruzada que se verá a posteriori. Su conformado es sencillo llevando a cabo las operaciones *Pad* y *Thread*.

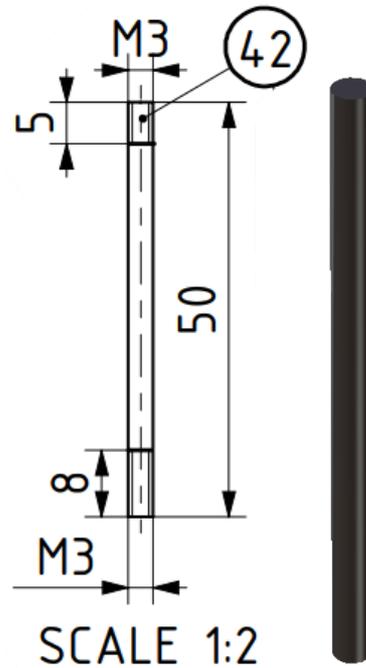


Ilustración 5.2-73 Plano y pieza, vástago de la válvula

5.2.4.19 Vigueta cruzada para bielas de la válvula

En esta pieza se instalan las bilas laterales y el vástago central de la válvula.

Para su modelaje se procede a realizar en un *Sketch* el contorno visto en el plano en planta. Una vez se tiene el perfil se revoluciona en torno a su eje central mediante la herramienta *Shaft*, de esta forma se obtiene un sólido con tres esferas macizas. Para darle la forma final se emplea la herramienta *Pocket*, “cortando” la pieza en la zona superior e inferior. Por último se realizan los taladros, como de costumbre, con la operación *Hole*.

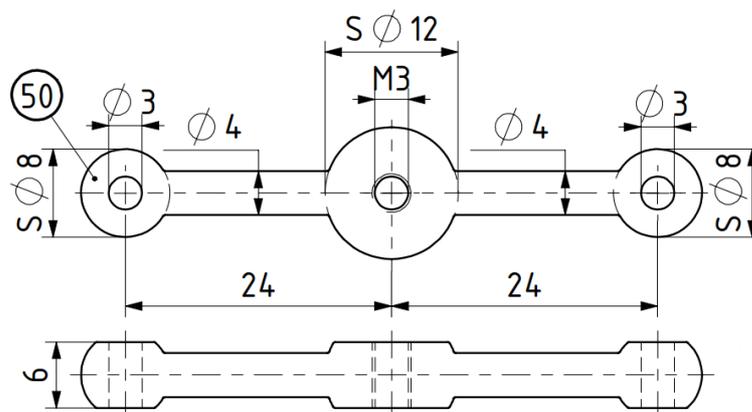


Ilustración 5.2-74 Plano, vigueta cruzada para bielas de la válvula



Ilustración 5.2-75 Pieza, vigueta cruzada para bielas de la válvula

5.2.4.20 Polea excéntrica

Como se vio anteriormente, la polea excéntrica se sitúa en el extremo delantero del cigüeñal, fijándose a él mediante cuatro tornillos ciegos que se introducen en los agujeros M3. Sobre esta polea se monta la biela excéntrica.

El único punto destacable de su conformado es el uso de la herramienta *Groove* con la finalidad de obtener la ranura en la que se inserta la biela excéntrica. El resto de procedimientos empleados son de más conocidos.

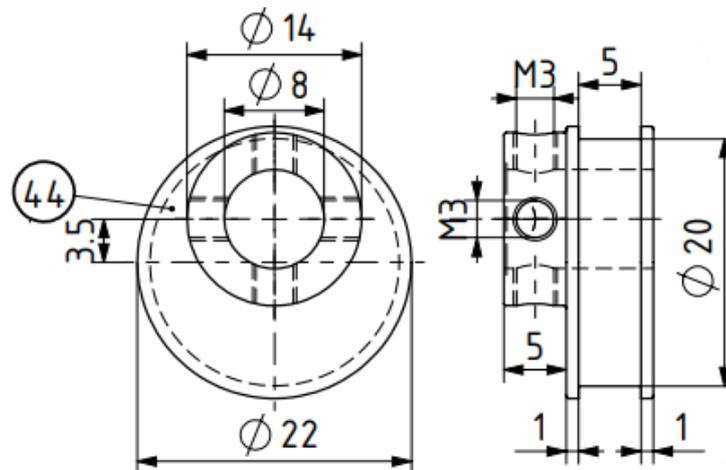


Ilustración 5.2-76 Plano, polea excéntrica



Ilustración 5.2-77 Pieza, polea excéntrica

5.2.4.21 Biela excéntrica

Esta pieza puede dividirse en tres componentes, el brazo de la biela, la abrazadera y el pasador. Tanto el brazo de la biela como la abrazadera son de latón, mientras que el pasador se conforma de acero.

El brazo de la biela se encarga de transmitir el movimiento desde el cigüeñal hasta la manivela de la válvula. Para modelarlo se realiza el perfil del componente y posteriormente se extruye para después terminar haciendo los taladros de diámetro 2.5 y 3 milímetros.

La abrazadera se conforma de forma análoga al brazo de la biela. El radio y espesor de la abrazadera es tal que encaja en la ranura de la polea vista en el apartado anterior, de esta forma y con la ayuda de dos tornillos se sujeta la biela a la polea.

En cuanto al pasador que se inserta por apriete en el extremo del brazo, se realiza un cilindro de radio 1.5mm y longitud 9mm.

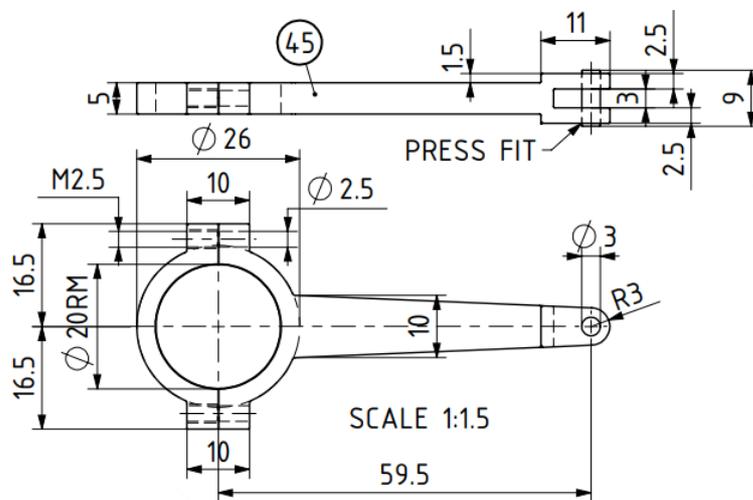


Ilustración 5.2-78 Plano, biela excéntrica



Ilustración 5.2-79 Pieza, biela excéntrica

5.2.5 Tornillos, tuercas y pasadores

Por último se muestran los componentes necesarios para el montaje del motor. Ya que sus funciones resultan obvias y los procesos para obtener sus modelos en el programa informático CATIA son triviales, solo se mostrarán un modelo final de cada tipo de pieza. Los planos y medidas tomadas pueden encontrarse en el Anexo A.

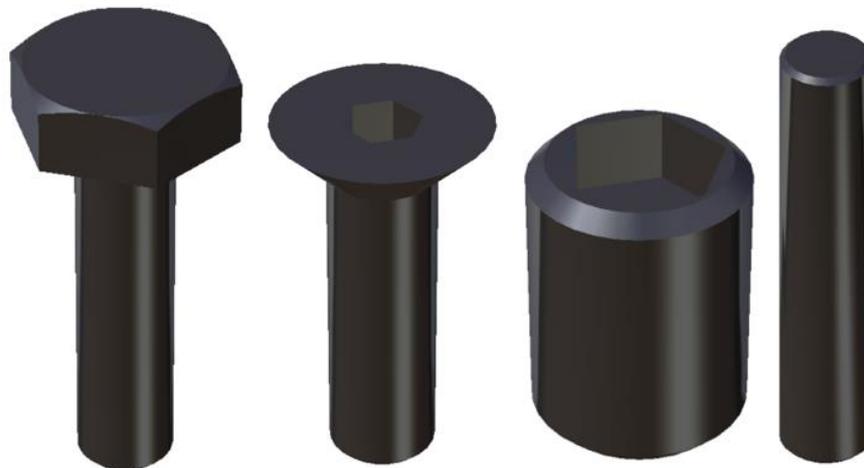


Ilustración 5.2-80 Tornillo, tornillo C-Sunk, tornillo ciego y espárrago

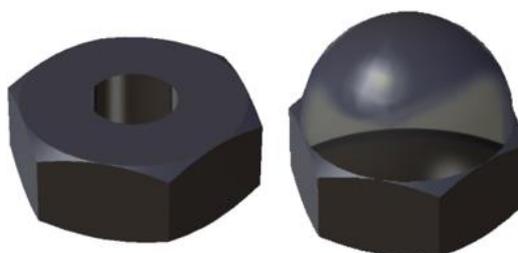


Ilustración 5.2-81 Tuerca y tuerca abovedada

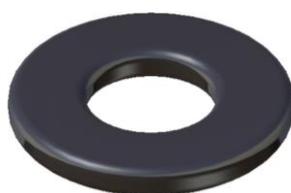


Ilustración 5.2-82 Arandela



Ilustración 5.2-83 Pasador

6 ENSAMBLADO

Una vez modeladas todas las piezas se pasa a su ensamblaje. Al estar la máquina de vapor de Simpson y Shipton formada por una gran cantidad de piezas, el ensamblaje se divide en subproductos. Estos subproductos se montan uno a uno para posteriormente unirlos obteniendo el modelo final.

A continuación y siguiendo con la estructura del apartado de modelado, se expone primero el módulo y herramientas de CATIA V5 empleadas para ensamblar las piezas, para posteriormente mostrar los resultados de los subconjuntos, terminando este bloque con el ensamblado final.

6.1 Módulo y herramientas

El ensamblaje se realiza a través del módulo *Assembly Design*. En los subapartados siguientes se exponen las herramientas usadas de dicho módulo.

6.1.1 Existing Component

Esta herramienta se emplea siempre que quiera introducirse un componente nuevo en el producto del ensamblaje. Para ello debe hacerse click en el nombre del producto del árbol de especificaciones de CATIA, apareciendo la ventana que se muestra en la ilustración 6.1-1. La ventana emergente permite seleccionar un CATPart previamente guardado en el equipo.

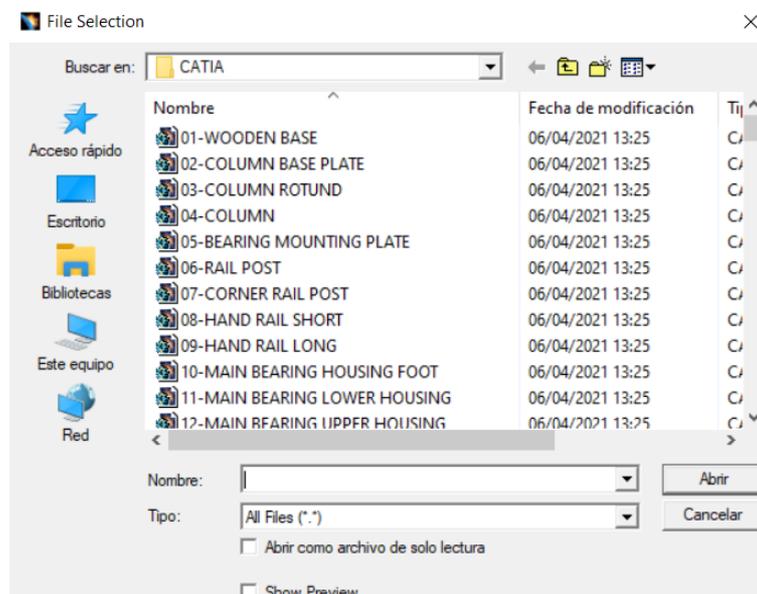


Ilustración 6.1-1 Ventana emergente de la herramienta *Existing Component*

6.1.2 Fix Component

Su uso es necesario para fijar un elemento del ensamblaje, sirviendo este elemento de referencia para el resto de componentes. Basta con seleccionar esta herramienta y hacer click en el componente que deseamos fijar.

6.1.3 Coincidence Constraint

Establece la restricción de coincidencia de ejes entre dos componentes.

Esta operación se emplea a lo largo del proceso de ensamblaje con todas las piezas insertadas en otras, ya sean ejes, rodamientos, tornillos, tuercas, arandelas o pasadores. Junto a alguna de las dos restricciones que se verán a continuación, suele ser suficiente para definir la relación entre dos piezas.

6.1.4 Contact Constraint

Esta herramienta establece entre los dos componentes seleccionados la restricción de contacto, pudiendo ser este contacto entre superficies y/o líneas.

6.1.5 Offset Constraint

Offset Constraint restringe la distancia entre dos planos, líneas y/o puntos de dos componentes distintos del producto. En la ventana de propiedades puede establecerse la orientación de la restricción así como su valor.

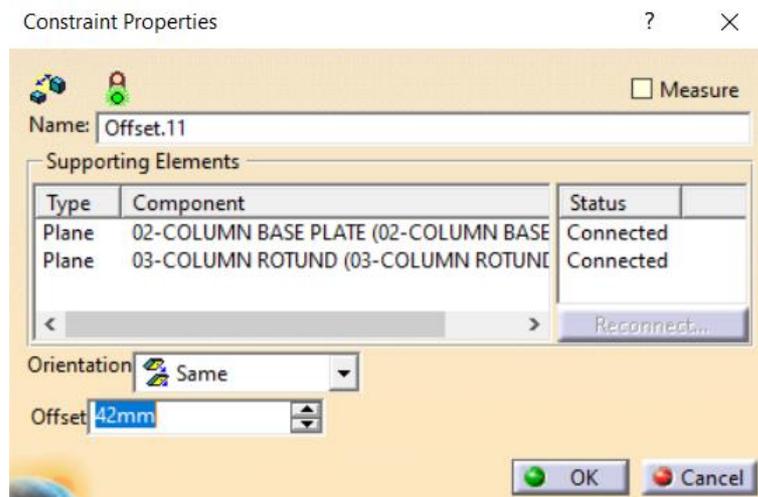
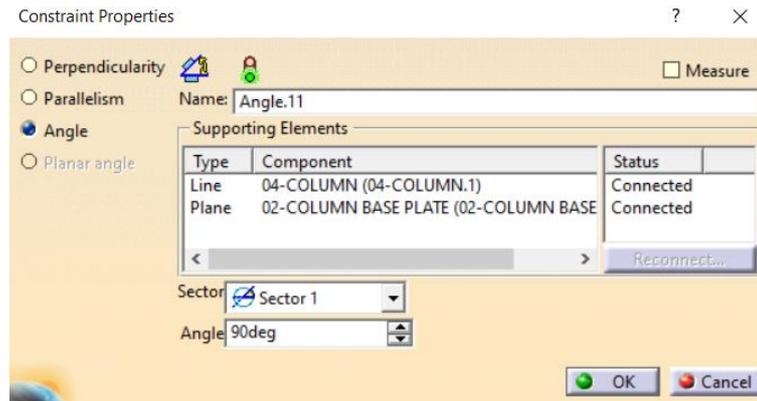


Ilustración 6.1-2 Ventana de propiedades *Offset Constraint*

6.1.6 Angle Constraint

La operación *Angle Constraint* permite fijar, a través de su ventana de propiedades, un valor de ángulo entre dos planos y/o líneas. Es posible establecer directamente condiciones de paralelismo o perpendicularidad o bien elegir el sector y el ángulo de forma manual.

Ilustración 6.1-3 Ventana de propiedades *Angle Constraint*

6.1.7 Manipulation

Permite la traslación o giro del componente seleccionado según el eje escogido en la ventana de la herramienta, ver ilustración inferior. Esta herramienta resulta útil para desplazar objetos, ordenando el espacio de trabajo de CATIA y facilitando la tarea de asignar restricciones.

Ilustración 6.1-4 Herramienta *Manipulation*

6.2 Subconjuntos

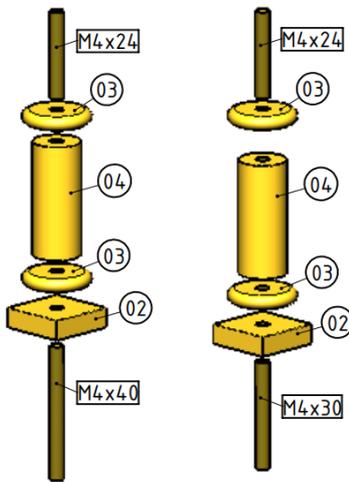
Una vez explicadas las herramientas del módulo, se exponen los subconjuntos de la máquina, indicando las piezas que los forman y la función de cada conjunto. En las tablas correspondientes de cada apartado aparecen el número de referencia, cantidad y nombre de las piezas que intervienen en el montaje.

El proceso de ensamblado de cada conjunto se obvia por ser repetitivo y trivial, sabiendo que en la mayoría de los casos basta con imponer dos restricciones por componente, soliendo ser estas una combinación de *Coincidence Constraint*, *Contact Constraint* y *Offset Constraint*.

6.2.1 Columnas

Se ensamblan dos tipos de columnas, uno de ellos correspondiente a las columnas que se sitúan entre la base de madera y la placa de soporte intermedia y el otro correspondiente a las columnas que soportan la placa de soporte del cilindro.

En total son necesarias 8 columnas del primer tipo, aquellas cuyo espárrago inferior tiene una longitud de 40mm, para su montaje en la base de madera y 4 columnas del segundo tipo para sostener la placa soporte del cilindro.

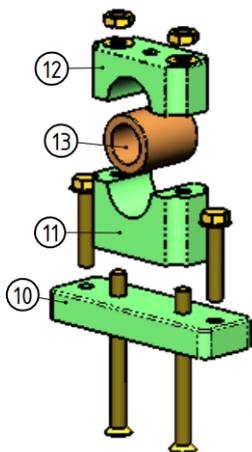


Ref.	Qty.	Term
02	12	COLUMN BASE PLATE
03	24	COLUMN ROTUND
04	12	COLUMN
M4x24	12	M4x24 STUD
M4x30	4	M4x30 STUD
M4x40	8	M4x40 STUD

Ilustración 6.2-1 Componentes de las columnas

6.2.2 Soporte de rodamientos

El cigüeñal de motor se instala en 4 soportes de rodamientos como el que se muestra en la ilustración 6.2-2.

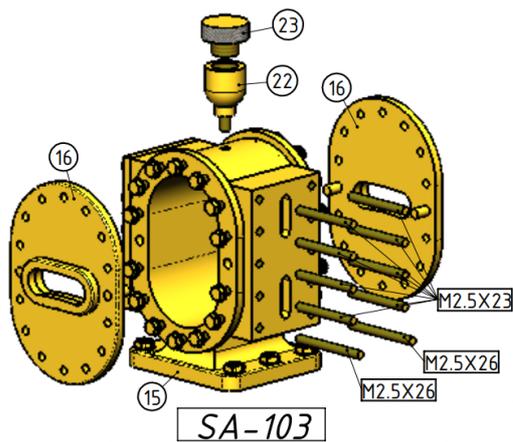


Ref.	Qty.	Term
10	4	MAIN BEARING HOUSING FOOT
11	4	MAIN BEARING LOWER HOUSING
12	4	MAIN BEARING UPPER HOUSING
13	4	MAIN BEARING
	8	M3 WASHER
	8	M3 NUT
	8	M3x31 C-SINK SCREW
	8	M3x16 HEX BOLT

Ilustración 6.2-2 Componentes de rodamientos

6.2.3 Cilindro

Se muestra a continuación el despiece del cilindro, incluyendo el engrasador y los espárragos que permiten el acoplamiento con el sistema de válvula.

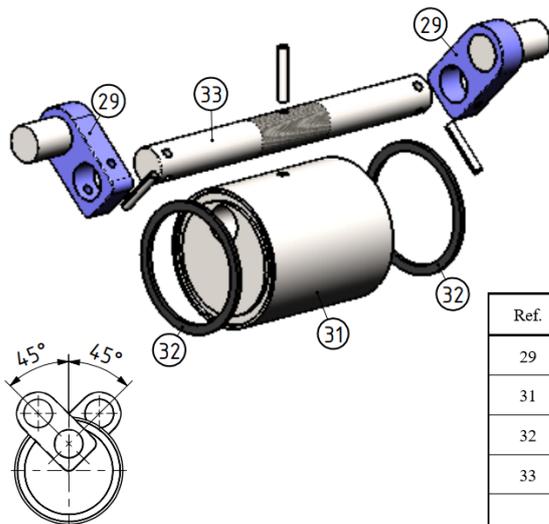


Ref.	Qty.	Term
15	1	CYLINDER
16	2	CYLINDER COVER
22	1	OILER
23	1	OILER SCREW COVER
17	1	DUMMY COVER
M2.5x23	8	M2.5x23 STUD
M2.5x26	2	M2.5x26 STUD
	38	M2.5x8 HEX BOLT
	6	M3 NUT

Ilustración 6.2-3 Componentes del cilindro

6.2.4 Pistón

En cuanto al pistón, debe insertarse en sus ranuras las juntas selladoras, acoplar el eje mediante un pasador M2x12 y posteriormente montar las manivelas en el eje, ajustándolas de manera que formen un ángulo de 45 grados entre ellas.



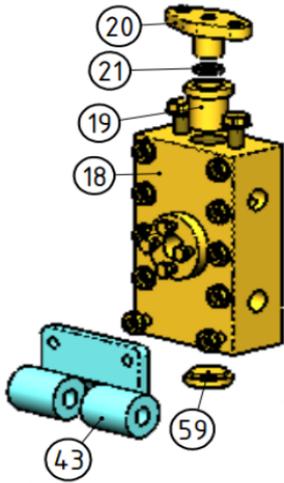
Ref.	Qty.	Term
29	2	PISTON ROD CRANK END
31	1	PISTON
32	2	PISTON RING SEAL
33	1	PISTON ROD
	3	M2x12 ROLLPIN

Ilustración 6.2-4 Componentes del pistón

6.2.5 Válvula y mecanismo

Se inserta en el cuerpo de la válvula las piezas 19 y 20, estando el aro sellador de teflón entre ellas. Estos componentes se fijan mediante dos tornillos M3x10mm.

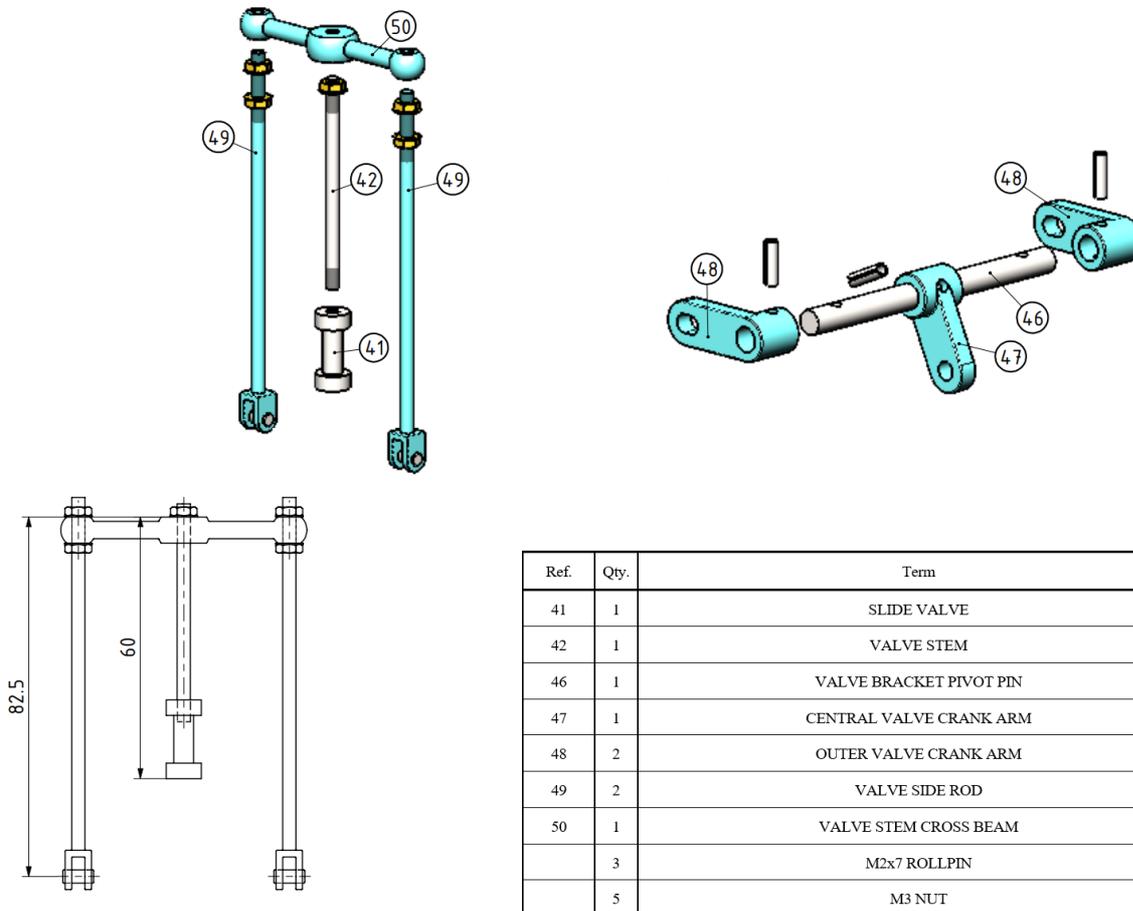
Este subconjunto comprende también las 10 tuercas M2.5 y los cuatro tornillos M2x8mm que permiten el ensamblaje con el cilindro y el bloque de la válvula de parada respectivamente.



Ref.	Qty.	Term
18	1	VALVE CHEST
19	1	VALVE CHEST PACKING BOX
20	1	VALVE CHEST GLAND
21	1	VALVE CHEST GLAND SEAL
43	1	VALVE CRANK BRACKET
59	1	VALVE CHEST PLUG
	4	M2x8 HEX BOLT
	10	M2.5 NUT
	2	M3x10 HEX BOLT

Ilustración 6.2-5 Componentes de la válvula

En cuanto a los mecanismos que transmiten el movimiento de la válvula corredera se distinguen dos partes. El conjunto de la biela de la válvula se ajusta según el plano de la ilustración inferior. Para el caso de la manivela montada en la pieza 43 de la ilustración 6.2-5, los brazos centrales y laterales de la manivela se unen a su eje por medio de tres pasadores M2x7mm.

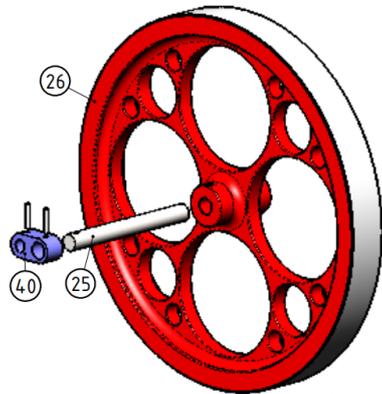


Ref.	Qty.	Term
41	1	SLIDE VALVE
42	1	VALVE STEM
46	1	VALVE BRACKET PIVOT PIN
47	1	CENTRAL VALVE CRANK ARM
48	2	OUTER VALVE CRANK ARM
49	2	VALVE SIDE ROD
50	1	VALVE STEM CROSS BEAM
	3	M2x7 ROLL PIN
	5	M3 NUT

Ilustración 6.2-6 Componentes del mecanismo de actuación de la válvula

6.2.6 Volante de inercia

El ensamblado del subconjunto del volante de inercia consiste en fijar el eje y el volante mediante los dos taladros M3 inclinados presentes en el volante. Se ha notado la falta en los planos de algún elemento para fijar estas dos piezas por lo que se han empleado dos tornillos ciegos M3x4mm. Para terminar con el bloque del volante de inercia se monta la manivela de acoplamiento con el cigüeñal mediante dos pasadores.



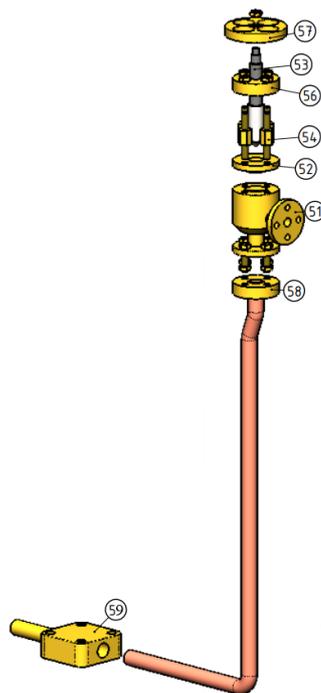
Ref.	Qty.	Term
25	1	CRANK SHAFT FLYWHEEL END
26	1	FLYWHEEL
40	1	FLYWHEEL CRANK SHAFT COUPLING CRANK
	2	M2x12 ROLL PIN
	2	M3x4 GRUB SCREW

Ilustración 6.2-7 Componentes del volante de inercia

6.2.7 Bloque de suministro y válvula de parada

La válvula de parada se monta colocando la tapa superior sobre el cuerpo de la válvula, introduciendo el husillo y roscando los cuatro tornillos espaciadores. En la rosca superior de estos se coloca la tuerca del tornillo de potencia la cual se fija mediante cuatro tuercas M2. Por último se instala la rueda manual que permite mover el husillo a voluntad del usuario.

El tubo de suministro se une a la válvula de parada a través de cuatro tornillos M2x8, mientras que en su extremo inferior se acopla el bloque conector de suministro de vapor.



Ref.	Qty.	Term
51	1	STOP VALVE BODY
52	1	STOP VALVE TOP COVER
53	1	STOP VALVE SPINDLE
54	4	SPINDLE SPACER BOLT
56	1	STOP VALVE SPINDLE NUT
57	1	STOP VALVE HAND WHEEL
58	1	STOP VALVE STEAM SUPPLY PIPE
59	1	STEAM SUPPLY CONNECTOR BLOCK
	4	M2x8 HEX BOLT
	9	M2 NUT

Ilustración 6.2-8 Componentes de la válvula de parada y bloque de suministro de vapor

6.2.8 Cigüeñal

El primer paso en el montaje del cigüeñal es insertar y colocar la polea excéntrica mediante cuatro tornillos ciegos que por apriete fijan la polea al eje. Seguidamente se unen a los extremos del eje principal las manivelas 27 y 28, empleando un pasador para cada manivela. Para terminar se ajusta el anillo retenedor en el brazo de la pieza 27.

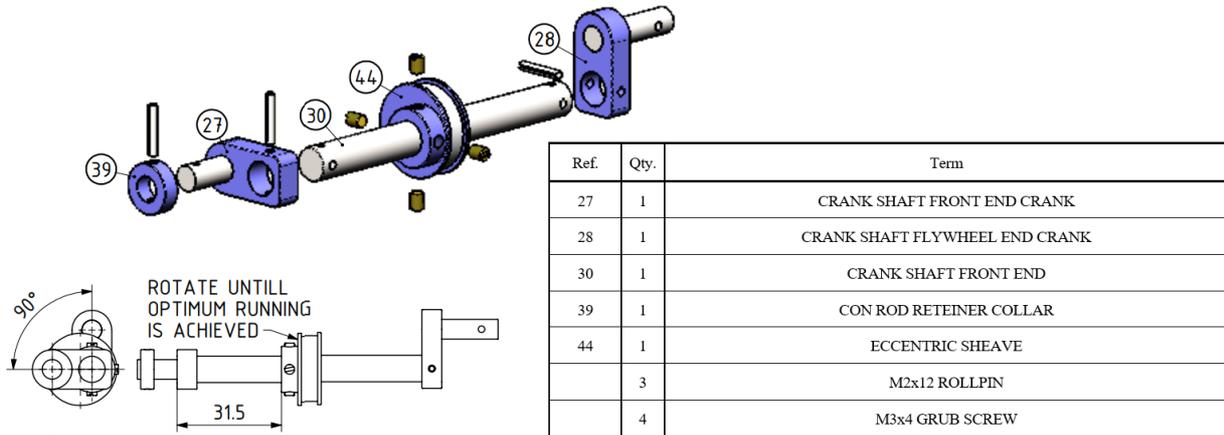
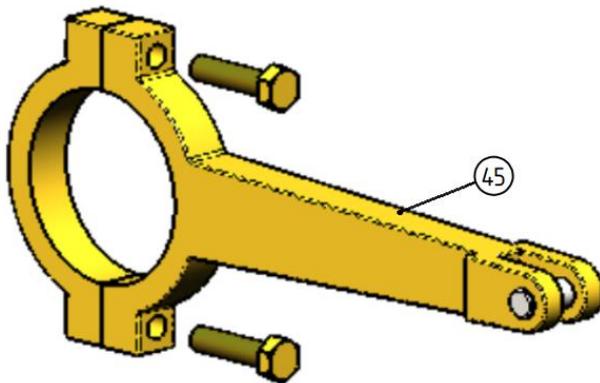


Ilustración 6.2-9 Componentes del cigüeñal

6.2.9 Biela excéntrica

Este subconjunto está formado únicamente por la biela excéntrica y los dos tornillos M2.5x10mm que permiten instalar la biela en la polea excéntrica.



Ref.	Qty.	Term
45	1	SLIDE VALVE
	2	M2.5x10 HEX BOLT

Ilustración 6.2-10 Componentes de la biela excéntrica

6.3 Ensamblado final

Una vez ensamblados los subgrupos, se procede a su montaje hasta obtener la máquina completa.

El primer paso consiste en la unión de la válvula corredera con el bloque de suministro y la válvula de parada, para ello se emplean cuatro tornillos M2x8mm.

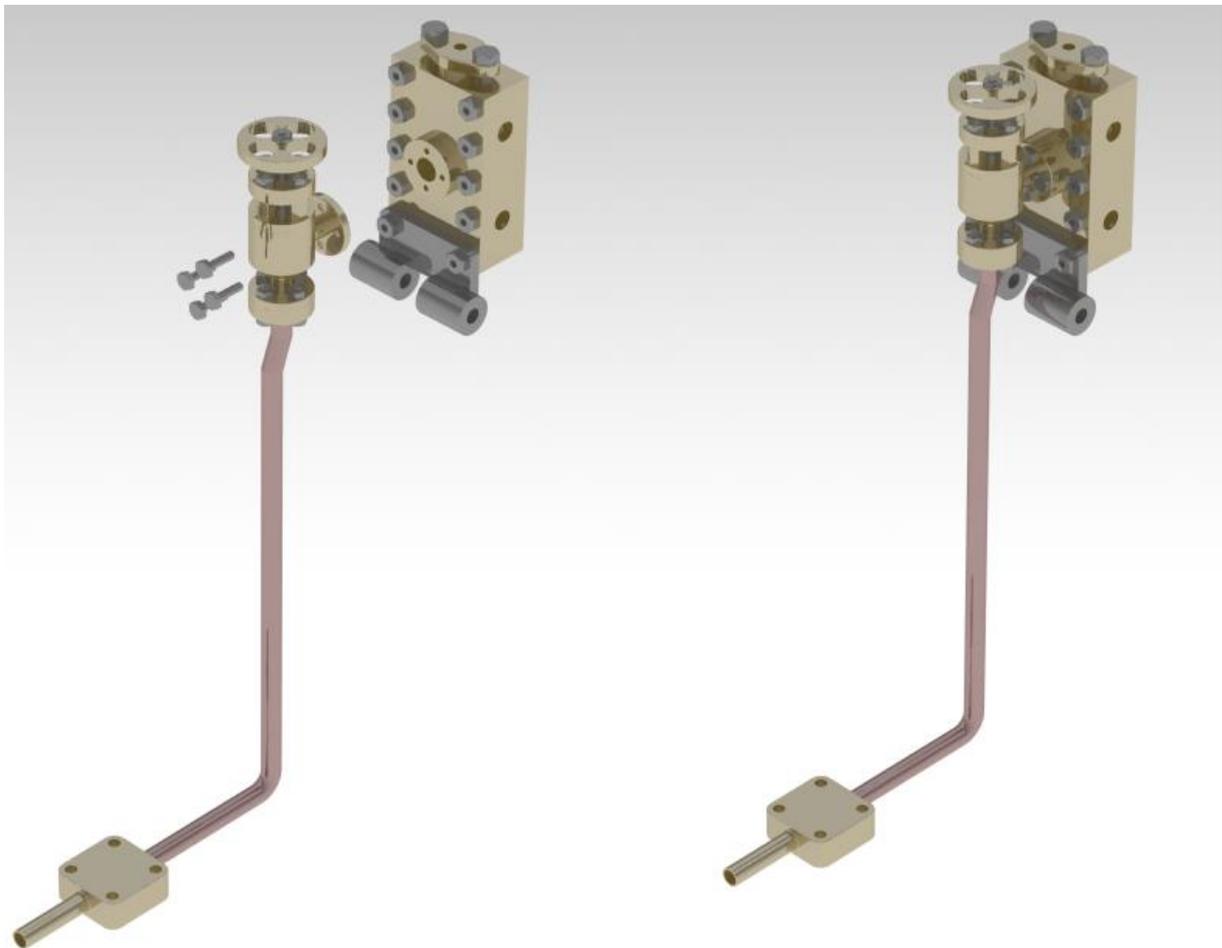


Ilustración 6.3-1 Montaje del bloque de suministro y válvula

Para el montaje del cilindro a la válvula, se introduce la válvula en los espárragos del cilindro, fijando el conjunto con 10 tuercas M2.5. Ver ilustración 6.3-2.

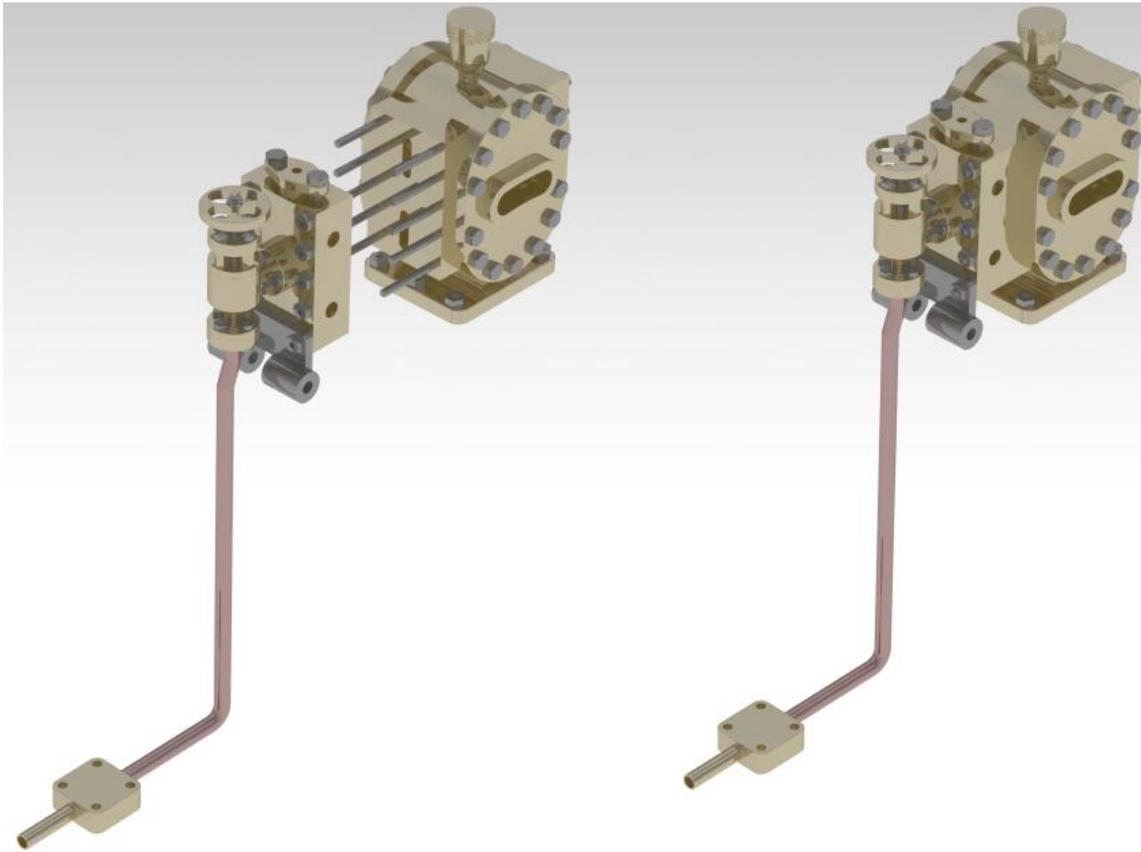


Ilustración 6.3-2 Montaje del cilindro

De forma similar al procedimiento anterior, se roscan seis espárragos M3x18mm en los agujeros centrales de la placa de soporte y se une al cilindro mediante seis tuercas M3.

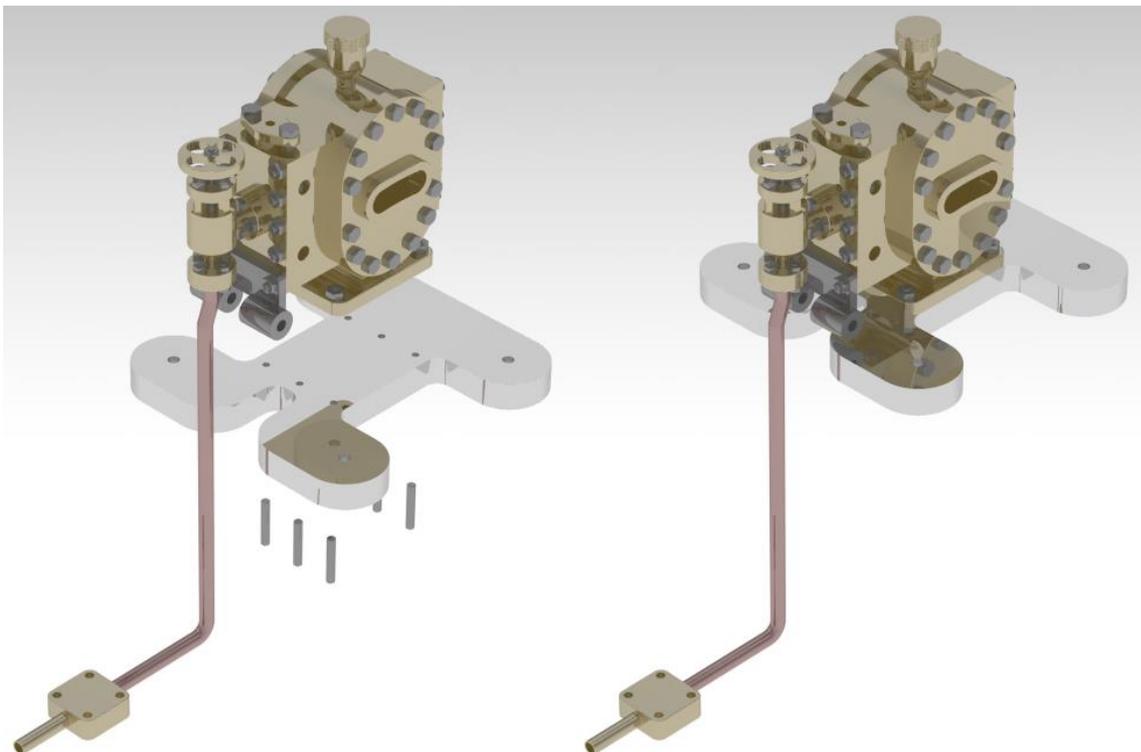


Ilustración 6.3-3 Montaje de placa de soporte del cilindro

Obtenido el bloque superior de la máquina, se procede a su instalación en la placa de soporte intermedia mediante las cuatro columnas vistas en el apartado 6.2.1. Para ello, se insertan los espárragos inferiores y superiores de las columnas en los correspondientes agujeros de la placa de soporte intermedia y en los agujeros laterales del soporte del cilindro respectivamente. El tubo de suministro debe introducirse por el taladro de 5 milímetros de diámetro.

En este paso del ensamblado también se roscan en la placa intermedia los cuatro rodamientos y seis tornillos M4x14mm que se emplearán para sujetar los postes de la barandilla.

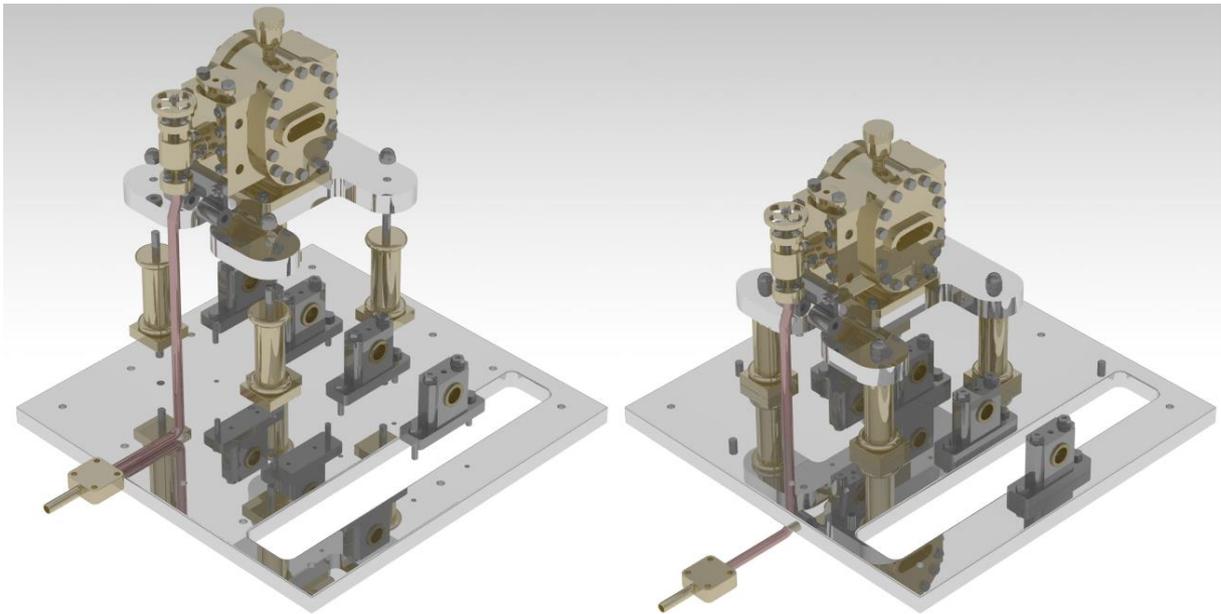


Ilustración 6.3-4 Montaje de placa intermedia y rodamientos

Para terminar de montar los componentes que forman la estructura de la máquina, se instala en la placa de soporte intermedia los postes y barandillas y se une el conjunto a la base de madera mediante las columnas restantes.

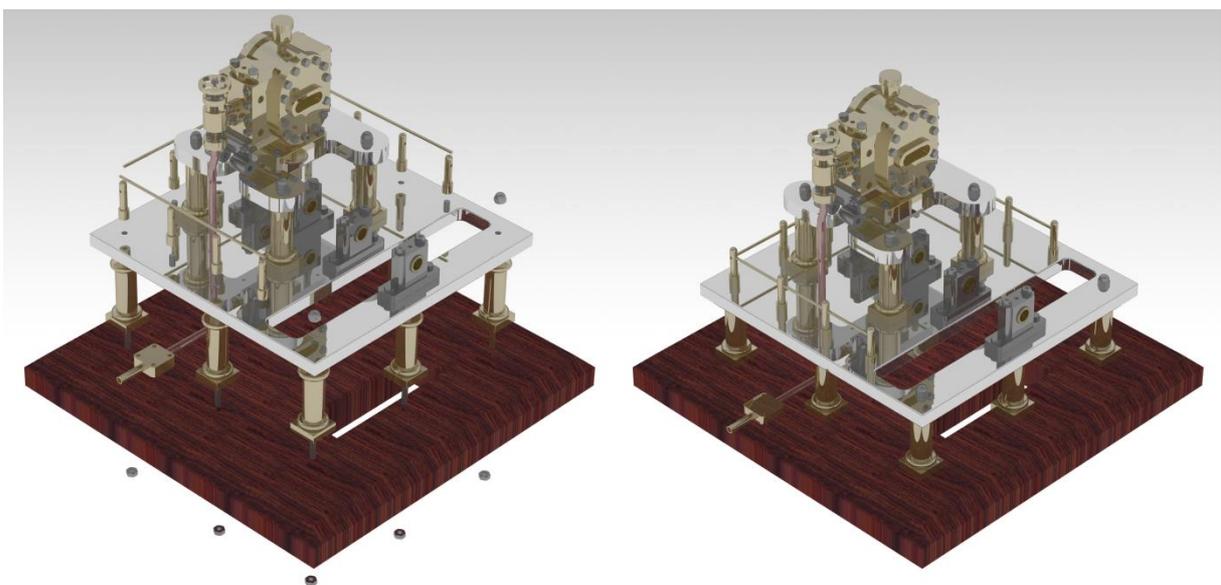


Ilustración 6.3-5 Montaje de base de madera

Se pasa entonces al montaje de todas las piezas móviles del motor. Empezando con el pistón, se introduce en el cilindro, haciendo pasar los ejes del mismo por las aperturas de las tapas frontales del cilindro. Una vez colocado el pistón se instala sobre su eje las manivelas según los planos de la ilustración 6.2-4. Posteriormente se ubica el cigüeñal en los soportes de rodamientos y se montan las bielas que lo unen con el eje del pistón, introduciendo los espaciadores necesarios para el correcto ajuste del mecanismo.

Por otro lado, el volante de inercia se inserta entre dos rodamientos, uniéndose con el cigüeñal mediante la pieza 40.

Por último se monta el mecanismo de la válvula corredera, ajustando la biela excéntrica en el cigüeñal y uniéndola al brazo central de la manivela instalada en el soporte del cuerpo de la válvula. El émbolo y el vástago central se introducen en la cámara del cuerpo de la válvula, uniéndose para terminar, las bielas laterales con los brazos exteriores de la manivela.



Ilustración 6.3-6 Montaje de componentes móviles



Ilustración 6.3-7 Zoom, montaje de componentes móviles

Se muestra a continuación una serie de vistas, obtenidas con la herramienta *Photo Studio Easy Tools*, de la máquina completa.



Ilustración 6.3-8 Icono de Photo Studio Easy Tools

La herramienta *Photo Studio Easy Tools* permite obtener imágenes renderizadas de alta calidad desde CATIA. Para ello es necesario hacer click en el icono que se muestra en la ilustración 6.3-7 apareciendo el desplegable,

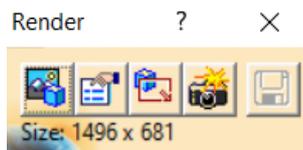


Ilustración 6.3-9 Herramienta Photo Studio Easy Tools

Mediante el primer icono (*Select Scene*) puede variarse el número y propiedades de la iluminación, las características y ubicación del suelo o bien puede elegirse un fondo. En cuanto al segundo icono, *Rendering Options*, ofrece la posibilidad de seleccionar la calidad con la que se quiere realizar el renderizado así como su resolución. Para terminar, la tercera y cuarta opciones permiten seleccionar la zona a renderizar y realizar el renderizado correspondientemente. Como se puede intuir, el último icono se usa para guardar la imagen.

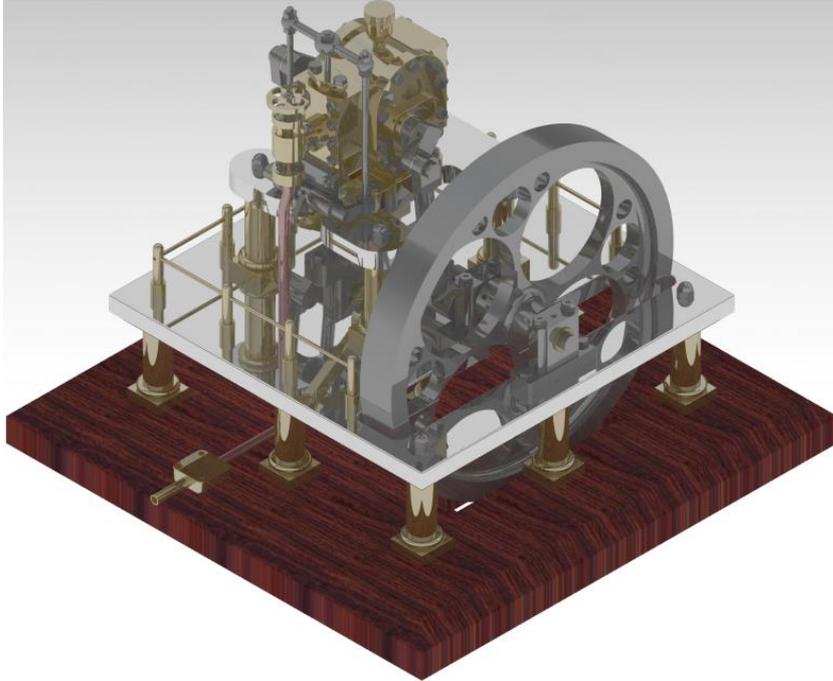


Ilustración 6.3-10 Vista isométrica 1 del motor

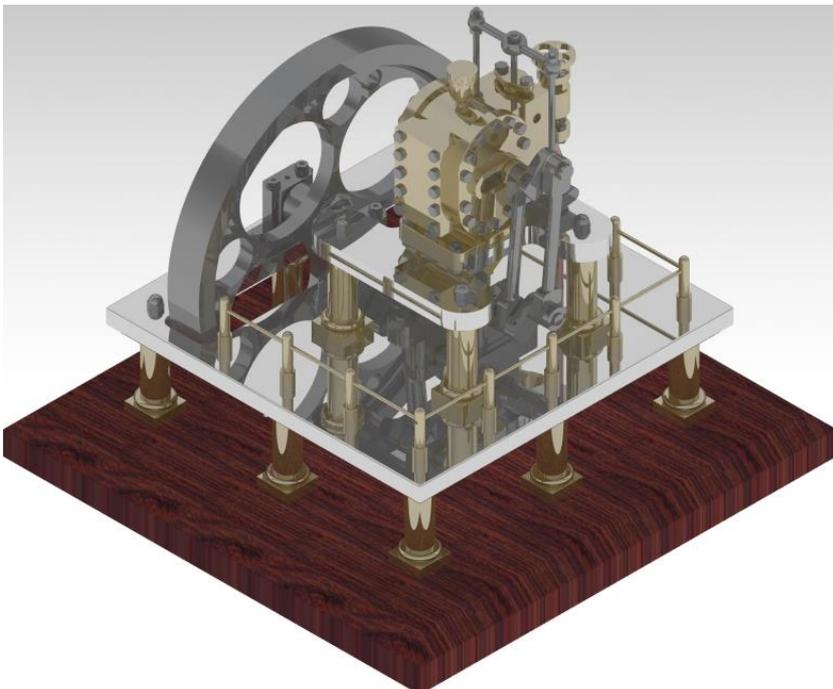


Ilustración 6.3-11 Vista isométrica 2 del motor

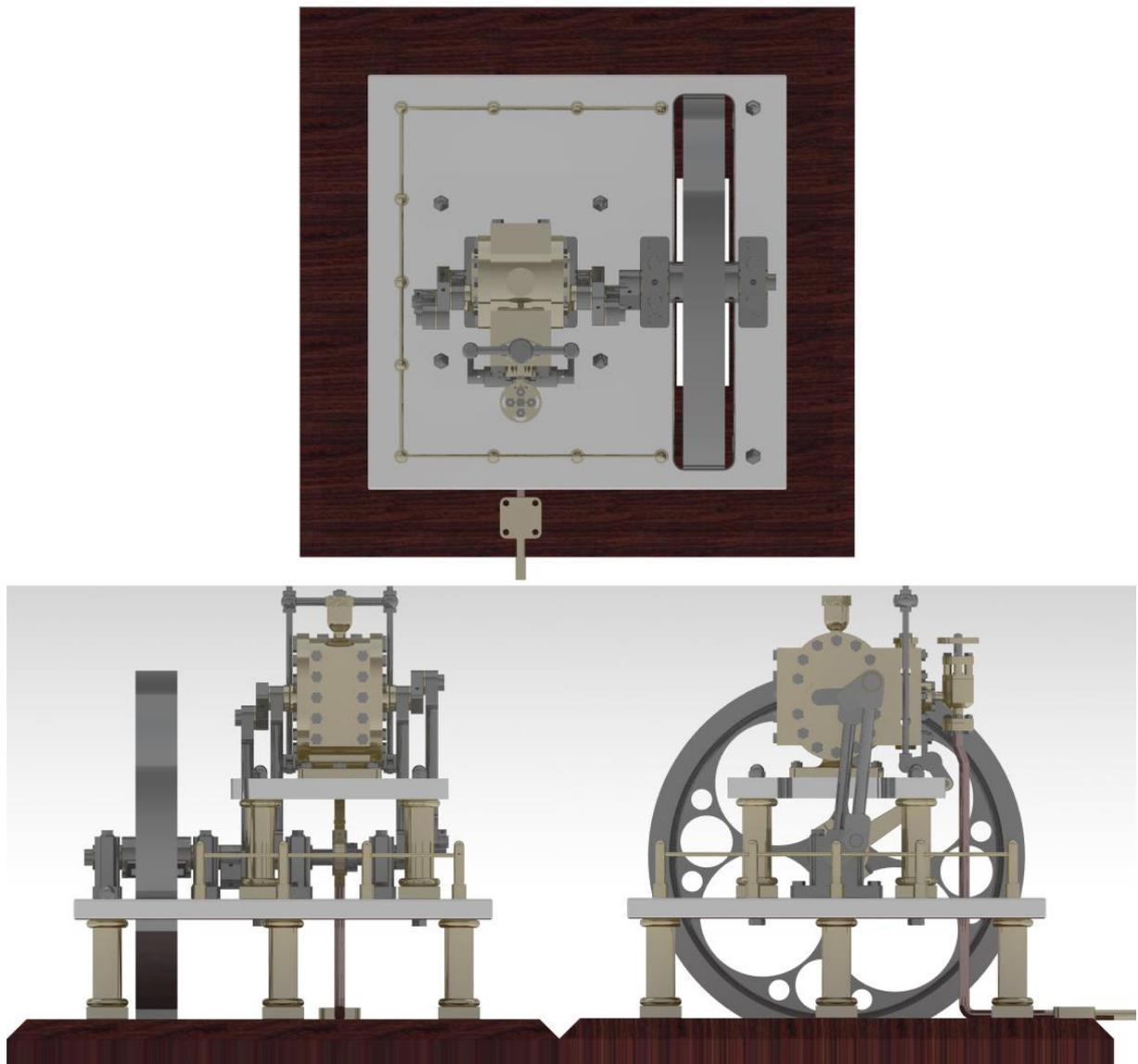


Ilustración 6.3-12 Vistas laterales y en planta del motor

7 ANIMACIÓN

Si siguiendo con la estructura adoptada hasta ahora, este bloque se divide en dos apartados. En el primero de ellos se expone el módulo de CATIA empleado, así como el funcionamiento de sus principales operaciones. Posteriormente se muestra el proceso seguido y los resultados que se obtienen al aplicar dichas operaciones a las piezas del modelo.

7.1 Módulo y herramientas

El módulo usado para lograr la animación del conjunto es el llamado *Digital Mockup*, concretamente, *DMU Kinematics*. El fin de este módulo es el de simular los movimientos de los elementos que componen el *Assembly*, definiendo mecanismos cinemáticos para después simularlos.

7.1.1 Fixed Part

Al igual que en el módulo de ensamblaje, el primer paso para elaborar un mecanismo es fijar una pieza y usarla de referencia. Su funcionamiento es idéntico a la herramienta *Fix Component*.

7.1.2 Revolute Joint

Permite crear, seleccionando dos líneas, dos planos y el *offset* entre ellos, un vínculo de rotación cuyo eje coincide con las líneas seleccionadas.

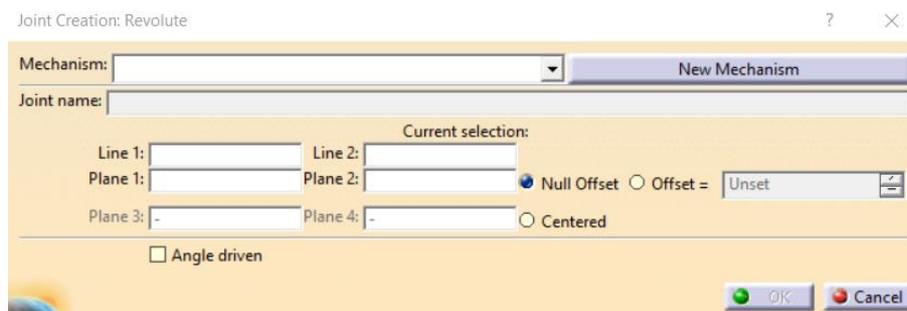


Ilustración 7.1-1 Ventana de propiedades *Revolute Joint*

7.1.3 Prismatic Joint

Esta herramienta crea un vínculo prismático seleccionando, para cada pieza, una línea y un plano contenidos en la dirección de la traslación.

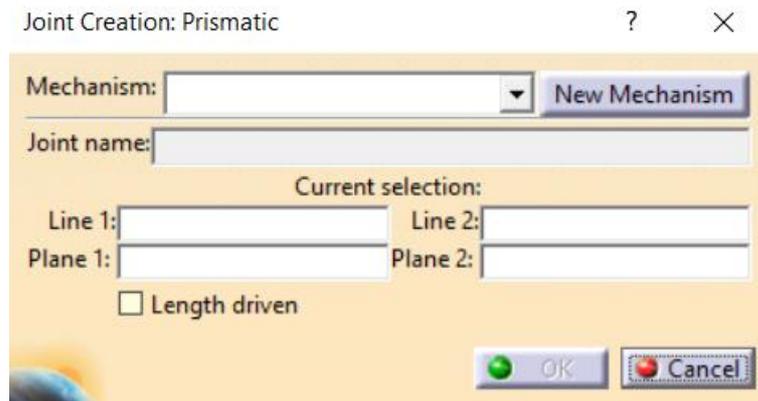


Ilustración 7.1-2 Ventana de propiedades *Prismatic Joint*

7.1.4 Rigid Joint

Como su nombre indica, la función de esta herramienta es la de unir de forma rígida dos piezas del ensamblaje. Para llevar a cabo esta operación basta con seleccionar las piezas deseadas.

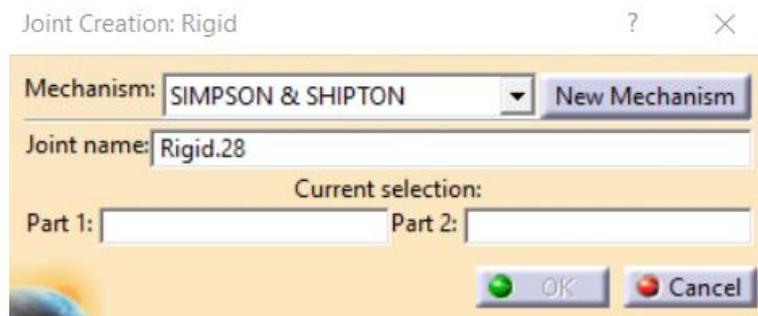


Ilustración 7.1-3 Ventana de propiedades *Rigid Joint*

7.1.5 Point Curve Joint

La herramienta *Point Curve Joint* permite vincular un punto y una curva de piezas distintas, permitiendo el movimiento del punto sobre la curva seleccionada.

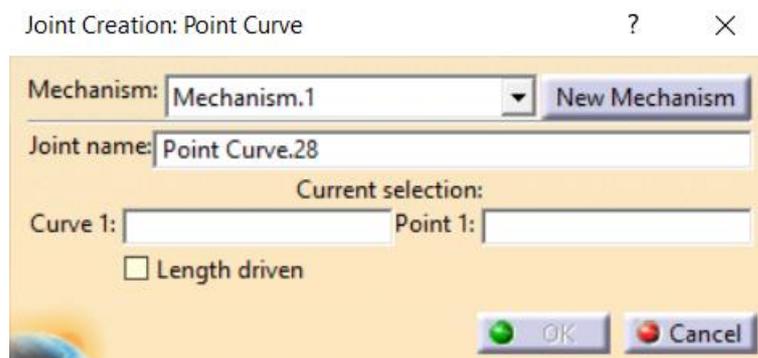


Ilustración 7.1-4 Ventana de propiedades *Point Curve Joint*

7.1.6 Slide Curve Joint

Esta restricción se emplea para establecer un contacto de rodadura entre dos curvas.

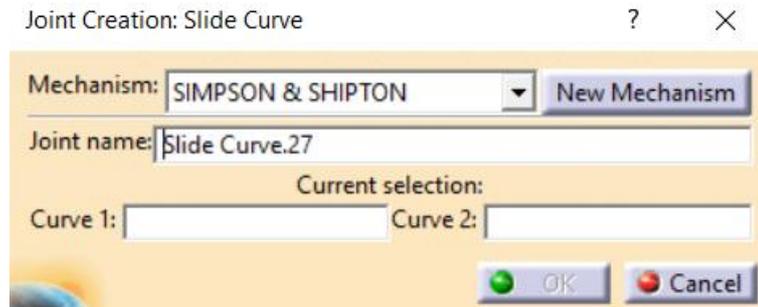


Ilustración 7.1-5 Ventana de propiedades *Slide Curve Joint*

7.1.7 Mechanism Analysis

Esta herramienta permite analizar las características y el estado de un mecanismo. Desde la ventana emergente puede seleccionarse el mecanismo que se desea analizar, observar los grados de libertad, los comandos motrices, el número de vínculos y una lista con cada uno de ellos, la pieza fija del mecanismo, así como si este es apto para ser simulado o no.

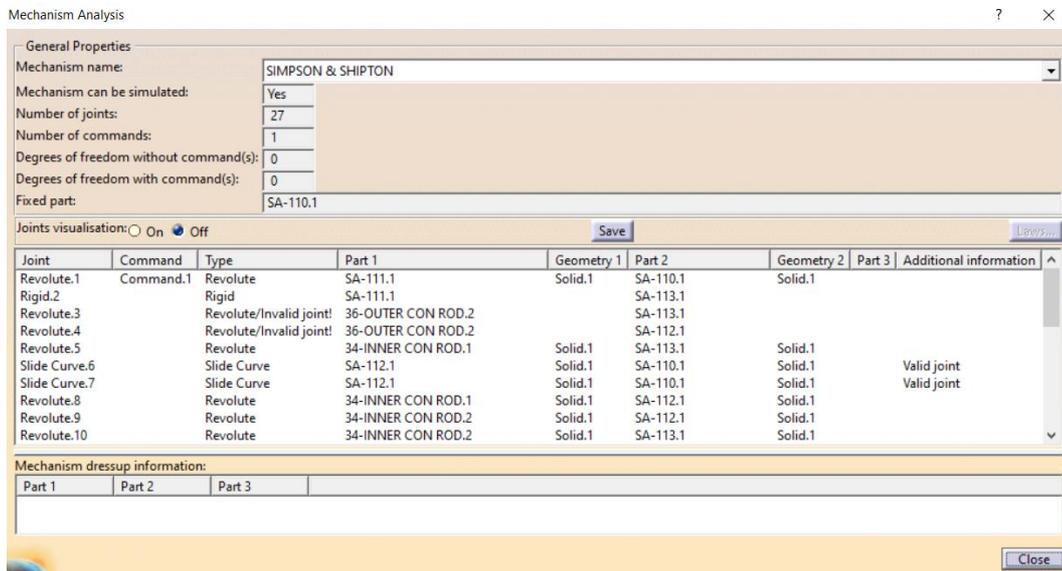


Ilustración 7.1-6 Herramienta *Mechanism Analysis*

7.1.8 Simulation

Una vez creado el mecanismo, la simulación se realiza mediante la operación *Simulation*. En su ventana puede seleccionarse entre otras opciones el rango del movimiento, la velocidad de la simulación, la creación de un bucle del movimiento.



Ilustración 7.1-7 Desplegable *Simulation*

Para extraer el resultado de la simulación en un archivo de vídeo se emplea *Compile Simulation*, segundo icono del desplegable. Esta herramienta también permite obtener un *Replay* de la simulación que puede reproducirse a posteriori en CATIA, modificando los bucles y la velocidad de reproducción.

7.2 Vínculos

Tras exponer las herramientas del módulo *DMU Kinematics* se pasa a su aplicación entre las distintas partes móviles del motor. Deberán imponerse tantos vínculos como sean necesarios para definir de forma íntegra el movimiento del motor, es decir, que el grado de libertad, *DOF* o *Degree Of Freedom* del mecanismo sea cero.

7.2.1 Volante de inercia

La rotación del volante de inercia se toma como el movimiento de entrada del mecanismo por simplicidad, por lo que a la hora de definir este vínculo se selecciona en la ventana de *Revolute Joint* la opción de *Angle driven*.

7.2.2 Cigüeñal

Una vez establecida la rotación del volante de inercia, se define el movimiento del cigüeñal mediante dos vínculos. El eje del cigüeñal debe rotar insertado en los rodamientos y además seguir el movimiento del volante de inercia, para ello se emplea un vínculo rígido para unir el cigüeñal al volante y otro vínculo de rotación respecto a los rodamientos del motor.

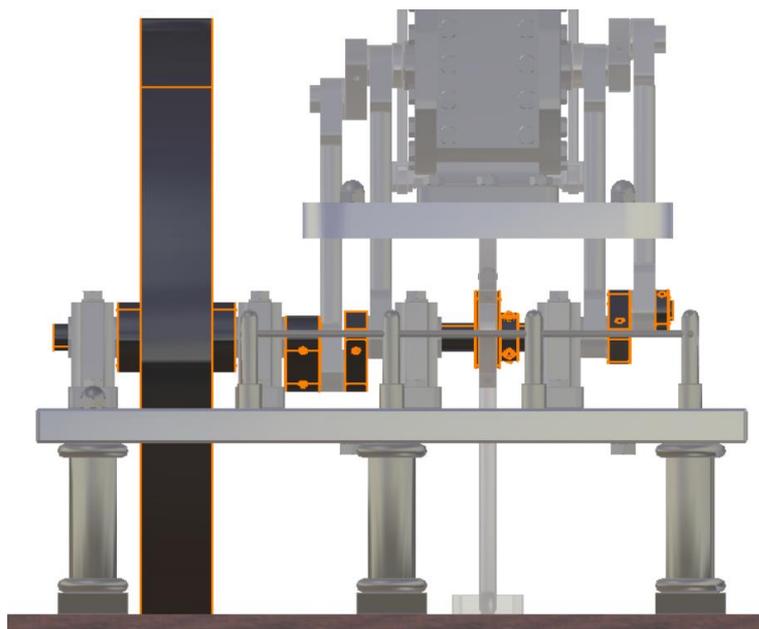


Ilustración 7.2-1 Vínculo del volante de inercia-cigüeñal

7.2.3 Bielas

En cuanto a las bielas, tanto las laterales como la biela excéntrica, el proceso para definir el movimiento de cada una de ellas es idéntico. Mediante operaciones del tipo *Rotate Joint* se vinculan sus extremos al cigüeñal y al eje del pistón o a la manivela de la válvula para el caso de la biela excéntrica. En la ilustración 7.2-2 se muestra la vinculación de la biela excéntrica, una representación análoga puede obtenerse para el resto de bielas.



Ilustración 7.2-2 Vínculos sobre cigüeñal-excéntrica-manivela de la válvula

7.2.4 Válvula

Para caracterizar el movimiento del émbolo dentro del cuerpo de la válvula es necesario crear varios vínculos entre las piezas de la máquina.

Primeramente y siguiendo con el apartado anterior de bielas, el movimiento de la manivela de la válvula se define creando una rotación anclada al soporte instalado en el cuerpo de la válvula, ver ilustración 7.2-3.

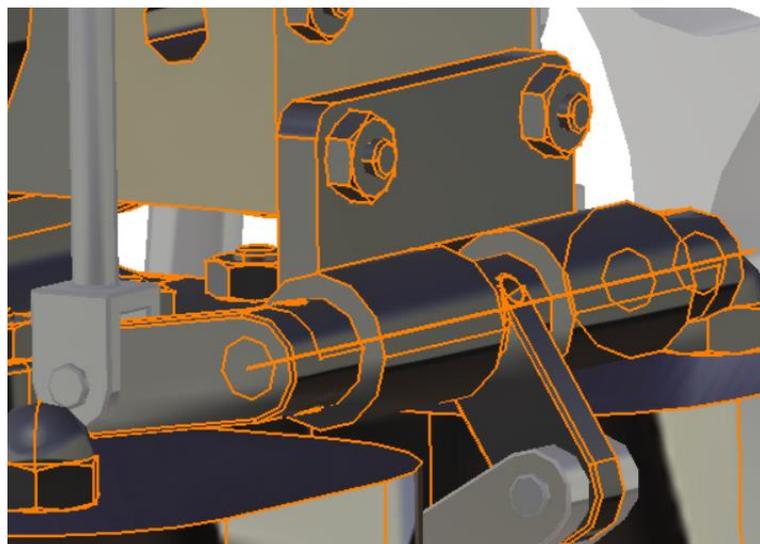


Ilustración 7.2-3 Vínculo de manivela de la válvula

Para transmitir el movimiento de la manivela al vástago central se vinculan los brazos laterales de la manivela con los vástagos laterales. Para ello se emplea la herramienta *Point Curve Joint*, en la que el punto será el centro del pasador que une físicamente las piezas en cuestión, y la curva sobre la que se restringe el movimiento de dicho punto será la línea central del taladro de los brazos laterales de la manivela. Ver ilustración 7.2-4 para

mayor entendimiento.

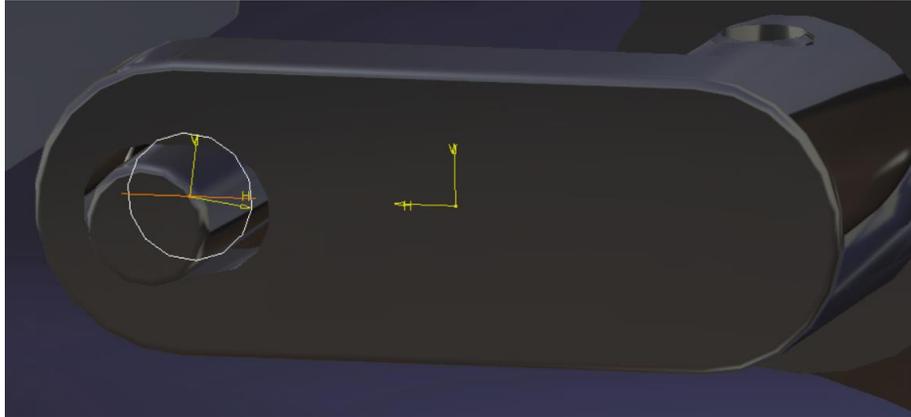


Ilustración 7.2-4 *Point Curve Joint*, Punto y línea empleados

Por último, para caracterizar completamente el movimiento de la válvula, se lleva a cabo una vinculación prismática entre el vástago central y su guía, restringiendo así el movimiento del vástago a puramente vertical.

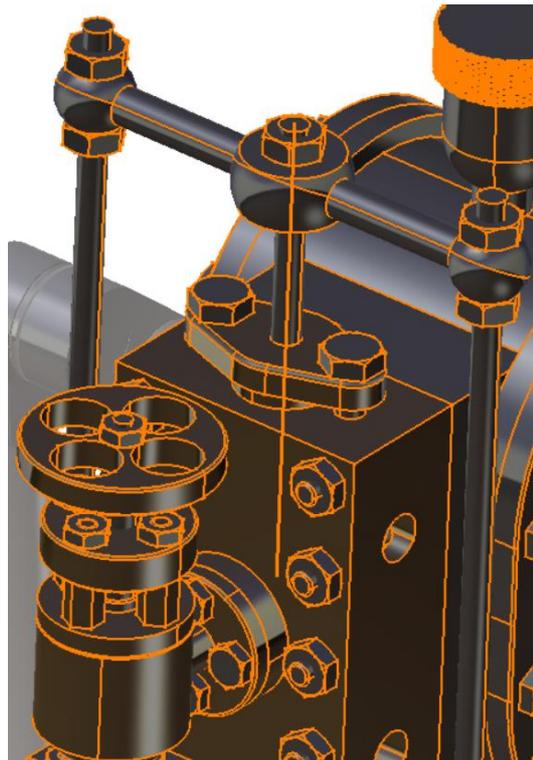


Ilustración 7.2-5 Vínculo sobre el vástago central

A método de comprobar el correcto funcionamiento de la válvula, puede realizarse una simulación del conjunto con la vista centrada en los taladros de conexión entre el cuerpo de la válvula y el cilindro, observando el recorrido del émbolo y si este se mueve acorde al pistón de la máquina.

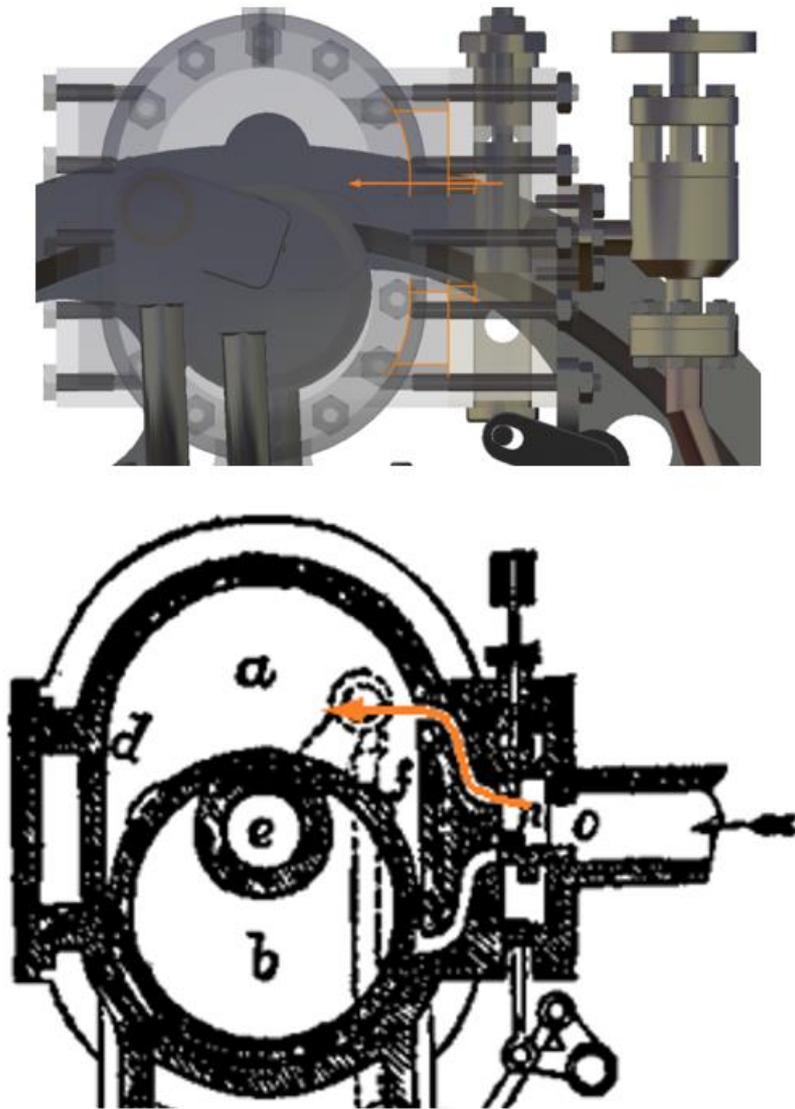


Ilustración 7.2-6 Comparativa del modelo con la literatura [13, pp. 152, fig-131]

7.2.5 Pistón

En cuanto al pistón, su movimiento dentro del cilindro se define fácilmente imponiendo dos vínculos del tipo *Slide Curve Joint*. El primero de ellos establece el contacto del pistón con las paredes internas del cilindro, mientras que el segundo restringe el movimiento del pistón a través de la exigencia de contacto entre el eje del pistón y la acanaladura de las tapas frontales del cilindro.

Los vínculos quedan definidos gráficamente en la ilustración inferior.

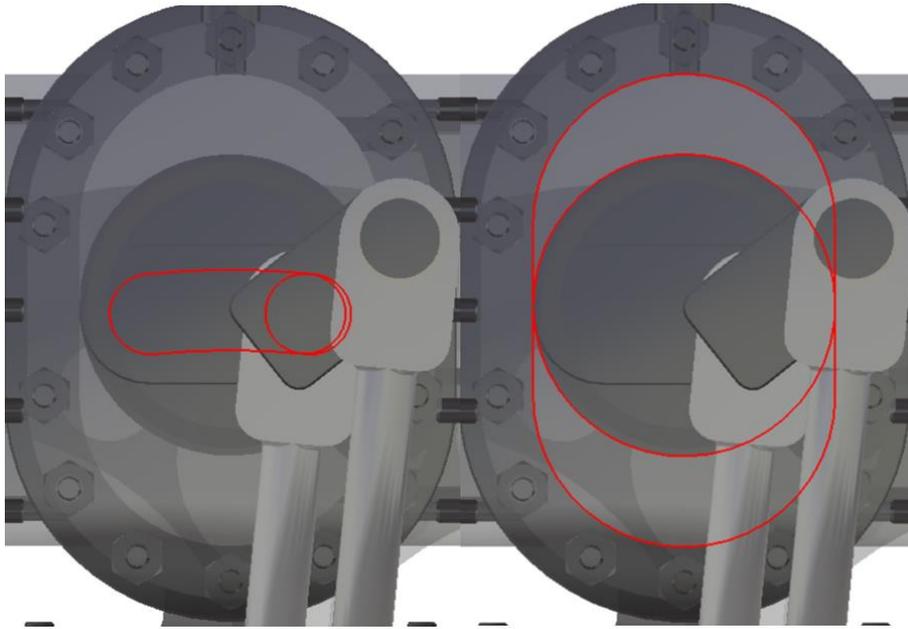


Ilustración 7.2-7 Vínculos sobre el pistón

Con estas dos últimas restricciones y junto a todas las impuestas anteriormente el movimiento del mecanismo queda caracterizado, sin embargo, existen otras partes móviles cuyo movimiento aún no se ha definido.

7.2.6 Espaciadores

Estos componentes, aunque no formen parte del mecanismo en sí, se mueven con él, “acompañando” a las piezas entre las cuáles están situadas en su movimiento. Ya que los grados de libertad del mecanismo es cero, se impone en cada espaciador un vínculo de tipo rígido entre la biela y el separador correspondiente. De esta forma se define el movimiento de los espaciadores sin incrementar el número de grados de libertad del mecanismo.

8 CONCLUSIÓN Y DESARROLLOS FUTUROS

En este capítulo, el último de este documento, se exponen una serie de conclusiones, así como posibles líneas de desarrollos futuros tras haber completado el proyecto.

A lo largo de este proyecto, se ha llevado a cabo la modelización y animación de un motor de vapor de alta presión de mediados del siglo XVIII diseñado por los ingenieros mancurianos Joseph Simpson y James Alfred Shipton. Todo el proceso de modelaje, animación y renderizado se ha realizado mediante el programa de diseño asistido por ordenador CATIA, concretamente la versión V5-R19. La estrategia seguida para alcanzar el propósito del proyecto ha sido modelar cada pieza por separado, un total de 84, en el módulo de *Part Design*, para posteriormente ensamblar todos los componentes del motor, un total de 422, empleando el módulo de *Assembly Design*. Para la consecución de estas tareas se ha seguido fielmente los planos creados por Stewart Hart, excepto en un punto, la numeración seguida en la lista de componentes y en los propios planos presenta una incongruencia para la pieza 57. Tanto la rueda manual de la válvula de parada como el tubo de suministro de vapor tienen asignados el número 57, es por ello que se le asigna el número 58 al tubo de suministro de vapor y se mantiene el número 57 para la rueda manual de la válvula de parada, ver planos de la ilustración 6.2-8. Por otra parte, al no incluir los planos de S.Hart detalles sobre los tornillos, tuercas, pasadores y arandelas requeridas, se hace uso de tablas de medidas normalizadas según la métrica correspondiente. Se recuerda que estos planos y tablas pueden encontrarse en el anexo A del presente documento. Una vez modelado y ensamblado el motor, la última parte de este proyecto consiste en reproducir el movimiento de la máquina en el entorno de CATIA, usando para ello el módulo de *DMU Kinematics*. En esta etapa, de nuevo, es esencial un aporte de Stewart Hart que complementa a la perfección la información sobre el funcionamiento del motor encontrada en la literatura antigua. Este aporte consiste en un fragmento de vídeo en el que se muestra una reproducción del motor de Simpson y Shipton (fabricado por el propio S.Hart) en funcionamiento.

En cuanto a la complejidad de este proyecto, podría decirse que se ha encontrado concentrada en un par de puntos del mismo. El primero de estos, y quizás el de mayor importancia, ha sido la búsqueda de información sobre una máquina antigua y poco conocida como este motor de carrera corta. Para ello, ha tenido que “seguirse el rastro” del motor partiendo del catálogo de la Gran Exposición de 1851 [10], terminando por encontrar un libro datado de 1854 [14] y una serie de artículos de escasa relevancia. El segundo punto cuya complejidad puede destacarse corresponde al ensamblaje del conjunto, debido no a la complejidad de las piezas en sí, sino al elevado número de componentes que forman el motor. Sabiendo esto, el ensamblado se ha realizado manteniendo el árbol de especificaciones lo más limpio y ordenado posible, distinguiendo todos los subconjuntos y creando varios niveles para ello.

Aunque el propósito de este proyecto se ha cumplido, aún podría complementarse con un estudio del funcionamiento del motor en un programa de análisis dinámico fluido computacional o sus equivalentes siglas en inglés, *CFD(Computational Fluid Dynamics)*. Una posible opción es el programa STAR CCM+, perteneciente a la empresa Siemens, cuyas posibilidades son extremadamente completas. Mediante el análisis del modelo en dicho programa, podría obtenerse resultados sobre el desempeño del motor y el comportamiento del vapor.

Otra línea de continuación del proyecto podría ser la fabricación del modelo empleando las piezas elaboradas en CATIA mediante el módulo *Machining* para generar códigos CNC de varios ejes. En el caso de no poder fabricarse el modelo debido a los materiales requeridos, también podría simularse el mecanizado de los componentes mediante el módulo *Machining Simulation*.

Con todo esto, puede darse por finalizado este proyecto, habiendo alcanzado el propósito del trabajo y los objetivos de profundización de conocimiento en CATIA planteados al inicio del mismo.

REFERENCIAS

- [1] “Simpson and Shipton short stroke engine”, *MODEL ENGINEER*, Vol.209 No.4434/4435/4437/4439/4441/4442, 2012.
- [2] “Official catalogue of the Great Exhibition of the works of industry of all nations”, 1851. [En línea]. Disponible en: https://books.google.es/books?id=OfMHAAAAQAAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=true[Accedido: 23-abr-2021]
- [3] GIRI, Leandro, “Máquinas térmicas desde la Antigüedad al siglo XVII: análisis histórico desde la Filosofía de la Técnica”. *Llull, Revista de la Sociedad Española de Historia de las Ciencias y de las Técnicas*, 2020, vol. 43, no 87, p. 29-43. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/LeandroGiri/publication/344695629_MAQUINAS_TERMICAS_DESDE_LA_ANTIQUEDAD_AL_SIGLO_XVII_ANALISIS_HISTORICO_DESDE_LA_FILOSOFIA_DE_LA_TECNICA/links/5f8a0369458515b7cf851f74/MAQUINAS-TERMICAS-DESDE-LA-ANTIQUeEDAD-AL-SIGLO-XVII-ANALISIS-HISTORICO-DESDE-LA-FILOSOFIA-DE-LA-TECNICA.pdf. [Accedido: 22-abr-2021]
- [4] Chaves Palacios, Julián, “Desarrollo tecnológico en la Primera Revolución Industrial”, *Dehesa*, 2004. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10662/10305>
- [5] “Newcomen, Thomas”[En línea]. Disponible en: http://historico.oepm.es/museovirtual/galerias_tematicas.php?tipo=INVENTOR&xml=Newcomen,%20Thomas.xml [Accedido: 19-abr-2021]
- [6] “El inventor de la primera máquina de vapor efectiva de la Historia; Newcomen.”[En línea]. Disponible en: <https://ahombrosdegigantescienciaytecnologia.wordpress.com/2015/08/05/la-primera-maquina-de-vapor-efectiva-de-la-historia-newcomen/> [Accedido: 19-abr-2021]
- [7] “Grandes figuras revolucionarias: James Watt.”[En línea]. Disponible en: <https://www.escuelapedi.com/blog/grandes-figuras-revolucionarias-james-watt/>. [Accedido: 19-abr-2021]
- [8] David Boettcher , “Thomas Newcomen and the Invention of the Steam Engine”[En línea]. Disponible en: <https://www.davidboettcher.com/newcomen.php>

- [9] “Revolución Industrial”, *Wikipedia*, 2021. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Revoluci3n_Industrial. [Accedido: 19-abr-2021]
- [10] “Gran Exposici3n”, *Wikipedia*, 2021. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Gran_Exposici3n[Accedido: 23-abr-2021]
- [11] “Official catalogue of the Great Exhibition of the works of industry of all nations”, 1851. [En línea]. Disponible en: https://books.google.es/books?id=OfMHAAAQAAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=true[Accedido: 23-abr-2021]
- [12] “Shipton and Simpson”, *Grace’s Guide to British Industrial History*. [En línea]. Disponible en: https://www.gracesguide.co.uk/Shipton_and_Simpson. [Accedido: 17-abr-2021]
- [13] Joseph Simpson, “Description of an improved reciprocating steam engine”, Manchester, 1849. [En línea]. Disponible en: <https://books.google.es/books?id=PoqyBHOHMloC&dq=inauthor%3a%22Joseph%20Simpson%22&hl=es&pg=PA1#v=onepage&q&f=false>
- [14] Robert Burn Scott, “The steam engine; its history and mechanism: being descriptions and illustrations of the stationary, locomotive, and marine engine.”, London H. Ingram, 1854. [En línea]. Disponible en: <https://archive.org/details/steamengineitshi00burnuoft/page/n7/mode/2up>. [Accedido: 09-abr-2021]
- [15] “Rotary engines in the 1850s and 1860s”, *Museum Alibaba*, 2008. [En línea]. Disponible en: <http://www.museum.alibaba.sk/MUSEUM/POWER/rotaryengines/rotaryeng3.htm>[Accedido:23-abr-2021]
- [16] “CATIA”, *Wikipedia*, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/CATIA>. [Accedido: 09-abr-2021]
- [17] “Dassault Aviation”, *Wikipedia*, 2021. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Dassault_Aviation. [Accedido: 09-abr-2021]

MATERIAL ABBREVIATIONS:

CI = CAST IRON
 CU = COPPER
 BRZ = BRASS
 BR2 = BRONZE OR GUN METAL
 BR3 = BRIGHT P.L.O. STEEL
 BR4 = BRIGHT P.L.O. STEEL
 ST = STAINLESS STEEL
 ALUM = ALUMINUM

OTHER ABBREVIATIONS:

PF = PRESS FIT
 O.A. = O.D. AFTER ASSEMBLY
 RM = REAM
 SA-XXX = SUB-ASSEMBLY-XXX

NOTES:

1. ALL PARTS WHICH DO NOT HAVE SIGNIFICANT FORCES APPLIED CAN BE SOLDERED TOGETHER USING SOFT SOLDER OTHERWISE USE SILVER SOLDER
2. ALL ENGINEING PRACTICES SHALL BE APPLIED WITH REFERENCE TO THE FOLLOWING STANDARDS
3. WHERE SPORES ON BOLTS ARE LISTED THE CLEARANCE HOLES SHALL BE APPROXIMATELY 5% TO 8% LARGER THAN THE MATCHING TAPPED HOLE
4. PREFERABLY ALL TAPPED HOLES TO BE METRIC PINE (M)
5. MATERIALS SPECIFIED ON DRAWINGS ARE NOTATIVE ONLY. THIS IS FOR THE ORDER TO USE MATERIALS WHICH WOULD BE THE MOST SUITED
6. THIS DESIGN IS BASED ON USING AVAILABLE STANDARD BAR STOCK MATERIALS

NOTES: THIS ENGINE WAS DESIGNED AND BUILT BY MR. STEWART HART (POTTY ENGINEER)

TITLE: SIMPSON AND SHIPTON SHORT STROKE STEAM ENGINE

DESIGNER: GENERAL ARRANGEMENT

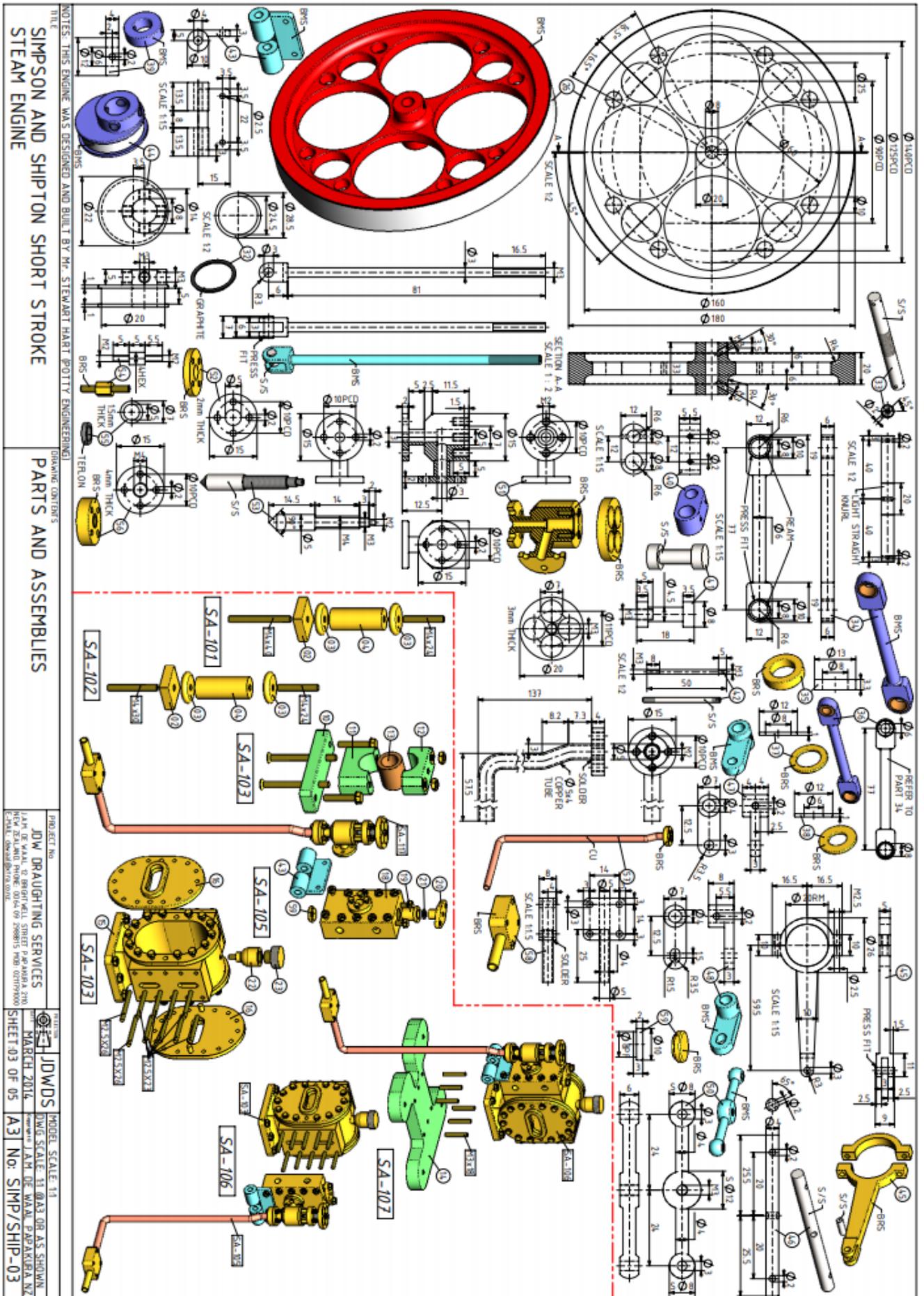
PROJECT No: JDW DRAUGHTING SERVICES
 1/47 DE WALK, 0' BIRCHTALL STREET P.O. BOX 2710
 NEW ZEALAND PHONE CODE: 09 2280005 MOB: 021779000
 FAX: 09 2280000

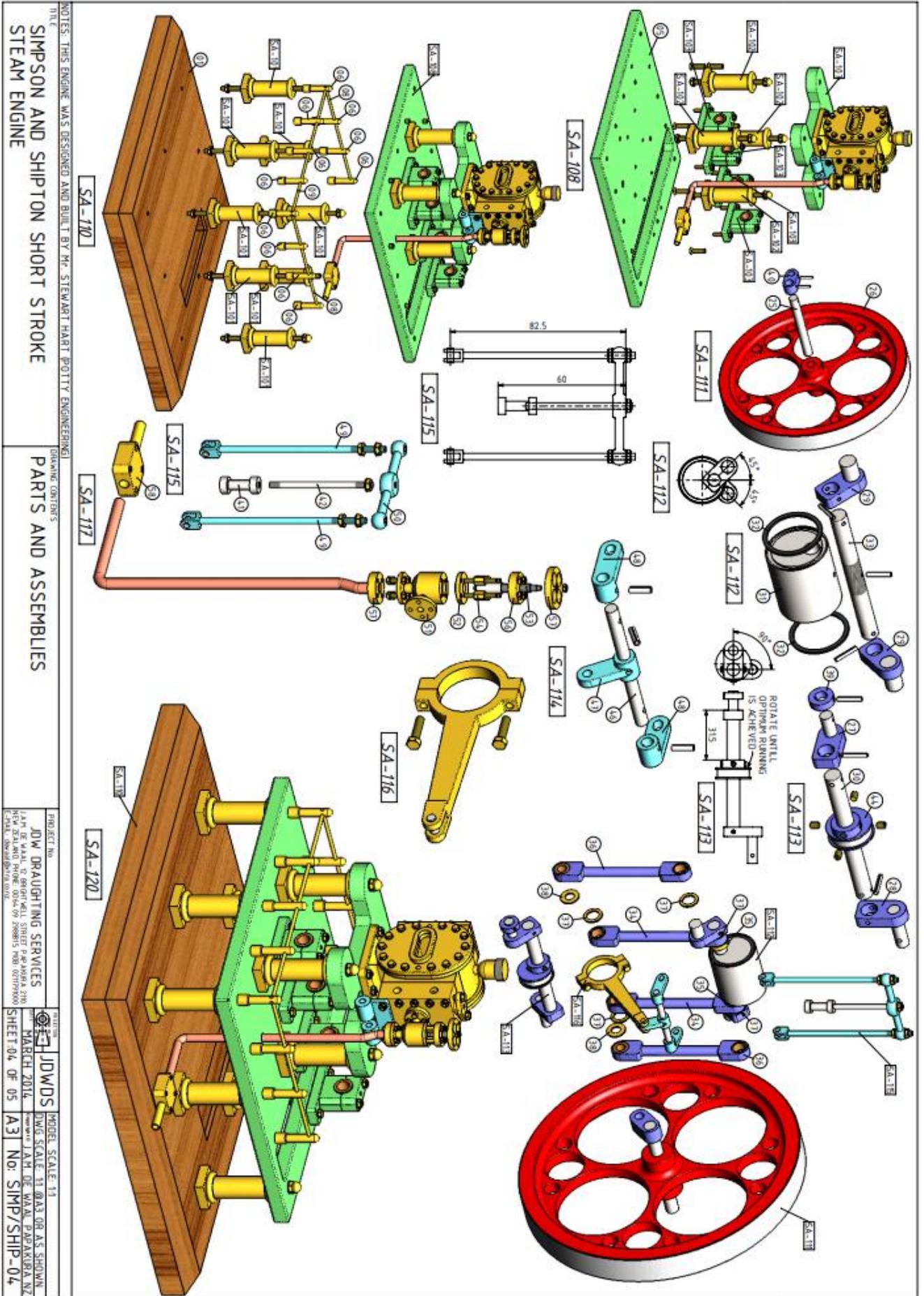
DATE: MARCH 2016

SCALE: 1:1

NO.: 01 OF 05

PROJECT: JDW DRAUGHTING SERVICES
 DRAWN BY: JDW
 CHECKED BY: JAW
 DATE: MARCH 2016
 SCALE: 1:1
 NO.: SIMP/SHIP-01



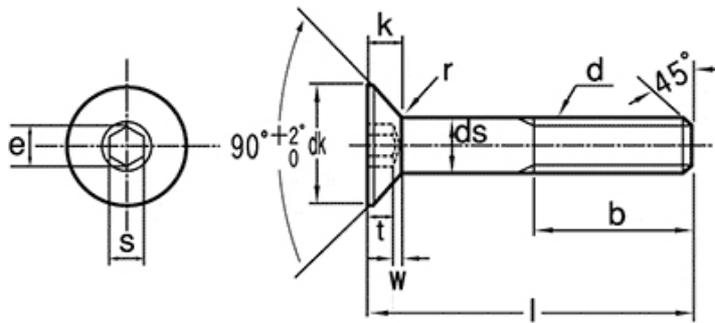


NOTES: THIS ENGINE WAS DESIGNED AND BUILT BY MR. STEWART HART (POTTY ENGINEERING)
 TITLE: SIMPSON AND SHIPTON SHORT STROKE STEAM ENGINE

DRAWING CONTENTS: PARTS AND ASSEMBLIES

PROJECT NO: JOW DRAUGHTING SERVICES
 LAY DE MAAL TO BERTHOUWEL STREET P.O. BOX 120
 1105 AA AMSTERDAM THE NETHERLANDS
 TEL: +31 (0)20 673 9200 FAX: +31 (0)20 673 9201
 DATE: MARCH 2014
 SHEET 04 OF 05
 MODEL SCALE: 1:1
 DWG SCALE: 1:1 (0A3 008 AS SHOWN)
 PART NO: 0A3 008 AS SHOWN
 NO: SIMP/SHIP-04

Tabla 2 Métricas tornillos



Unit: mm

Nominal Diameter M		3	4	5	6	8	10	12	16	20
Pitch P		0.5	0.7	0.8	1	1.25	1.5	1.75	2	2.5
b	Reference	18	20	22	24	28	32	36	44	52
	Maximum	3	4	5	6	8	10	12	16	20
Φds	Minimum	2.86	3.82	4.82	5.82	7.78	9.78	11.73	15.73	19.67
	Theoretical Dimension: Maximum	6.72	8.96	11.20	13.44	17.92	22.40	26.88	33.60	40.32
Φdk	Actual Dimension: Minimum	5.54	7.53	9.43	11.34	15.24	19.22	23.12	29.01	36.05
	Maximum	1.86	2.48	3.10	3.72	4.96	6.20	7.44	8.80	10.16
s	Nominal	2	2.5	3	4	5	6	8	10	12
	Maximum	2.080	2.580	3.080	4.095	5.140	6.140	8.175	10.175	12.212
	Minimum	2.020	2.520	3.020	4.020	5.020	6.020	8.025	10.025	12.032
t	Minimum	1.1	1.5	1.9	2.2	3.0	3.6	4.3	4.8	5.6
w	Minimum	0.25	0.45	0.66	0.7	1.16	1.62	1.8	2.2	2.2
Full Thread	Maximum	25	25	30	35	45	50	60	70	90
r	Minimum	0.1	0.2	0.2	0.25	0.40	0.40	0.60	0.60	0.80
e	Minimum	2.3	2.87	3.44	4.58	5.72	6.86	9.15	11.43	13.72

Tabla 3 Métricas tuercas

规格 D	厚度 M	对边 S
M1.6	1.3	3.2
M2	1.6	4
M2.5	2	5
M3	2.4	5.5
M4	3.2	7
M5	4	8
M6	5	10
M8	6.5	13
M10	8	17
M12	10	19
M14	11	22
M16	13	24
M18	15	27
M20	16	30
M22	18	32
M24	19	36
M27	22	41
M30	24	46
M33	26	50

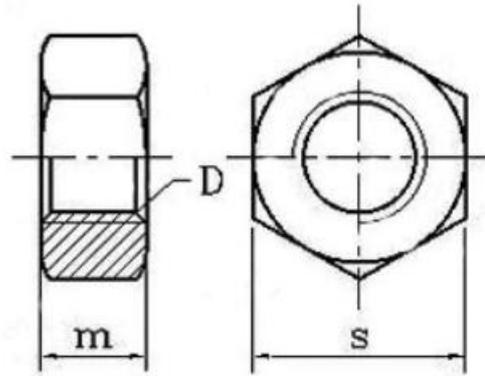
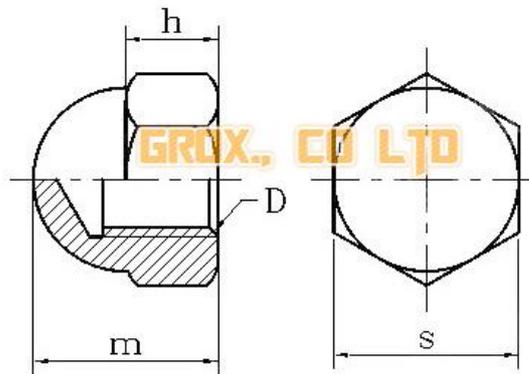


Tabla 4 Métricas tuercas abovedadas



Unit:mm					
Specifications	D	h	m	s	
				max	min
M3	3	2.5	6	5.5	5.32
M4	4	3	7	7	6.78
M5	5	4	9	8	7.78
M6	6	5	11	10	9.78
M8	8	6	15	13	12.73
M10	10	8	18	16	15.73
M12	12	10	22	18	17.73
M14	14	11	24	21	20.67
M16	16	13	26	24	23.67

Tabla 5 Métricas arandelas

Size (d)	d1	d2	h
M3	3.20	9.00	0.80
M4	4.30	12.00	1.00
M5	5.30	15.00	1.20
M6	6.40	18.00	1.60
M8	8.40	24.00	2.00
M10	10.50	30.00	2.50
M12	13.00	37.00	3.00
M14	15.00	44.00	3.00
M16	17.00	50.00	3.00
M18	20.00	56.00	4.00
M20	22.00	60.00	4.00
M24	26.00	72.00	5.00
M30	33.00	92.00	6.00

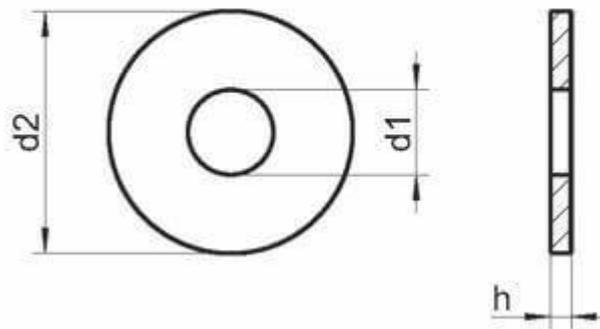
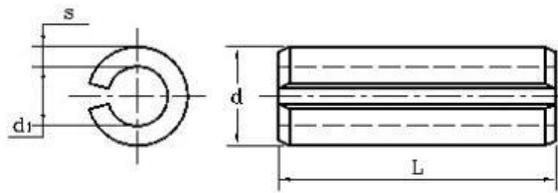
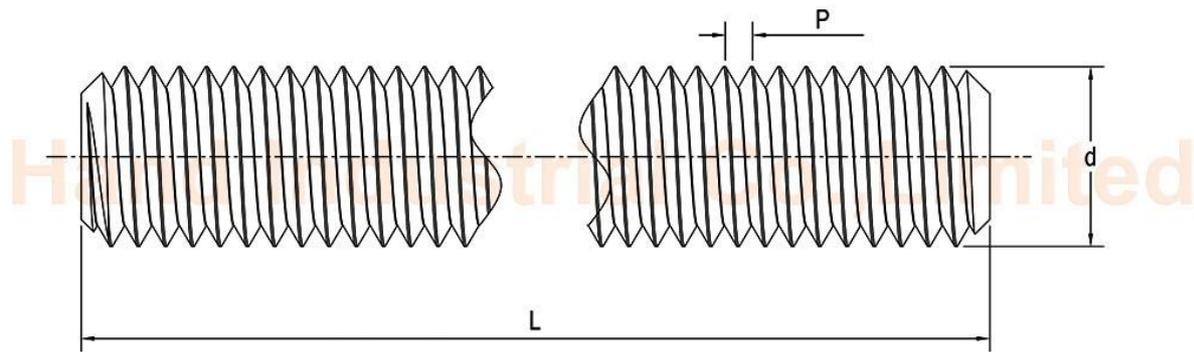


Tabla 6 Métricas pasadores



Size	d		s
	max	min	
M1	1.3	1.2	0.2
M1.5	1.8	1.7	0.3
M2	2.4	2.3	0.4
M2.5	2.9	2.8	0.5
M3	3.5	3.2	0.6
M3.5	4	3.8	0.75
M4	4.6	4.4	0.8
M5	5.6	5.4	1
M6	6.7	6.4	1.2
M8	8.8	8.5	1.5
M10	10.8	10.5	2
M12	12.8	12.5	2.5
M16	16.8	16.5	3

Tabla 7 Métricas espárragos



d	M2	M2.5	M3	M3.5	M4
p	0.4	0.45	0.5	0.6	0.7
d	M5	M6	M8	M10	M12
p	0.8	1	1/1.25	1/1.25/1.5	1/1.25/7.75
d	M14	M16	M18	M20	M22
p	1.5/2	1.5/2	1.5/2.5	1.5/2.5	1.5/2.5
d	M24	M27	M30	M33	M36
p	2.0/3	2.0/3	2/3.5	2/3.5	3.0/4
d	M39	M42	M45	M48	M52
p	3.0/4	3/4.5	3/4.5	3.0/5	3.0/5

