

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Modelado y animación en CATIA V5 de una  
máquina de vapor portátil con válvula de pistón

Autor: Francisco Santana Román

Tutor: Rafael Ortiz Marín

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

Sevilla, 2022





Trabajo Fin de Gradp  
Grado en Ingeniería Aeroespacial

# **Modelado y animación en CATIA V5 de una máquina de vapor portátil con válvula de pistón**

Autor:

Francisco Santana Román

Tutor:

Rafael Ortiz Marín

Profesor colaborador

Dpto. Ingeniería Gráfica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2022



Trabajo Fin de Grado: Modelado y animación en CATIA V5 de una máquina de vapor portátil con válvula de pistón

Autor: Francisco Santana Román

Tutor: Rafael Ortiz Marín

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal



# Agradecimientos

---

A mis padres y a Prado.





# Resumen

---

En este trabajo de fin de grado se realizará el modelado de una máquina de vapor portátil gobernada por una válvula de pistón. Durante el desarrollo del mismo, se detallará el proceso seguido para modelar cada una de las piezas que componen la máquina de vapor, posteriormente se ensamblarán los diferentes elementos en subconjuntos hasta llegar al conjunto final, y para finalizar se realizará el renderizado y una animación que caracterice el comportamiento dinámico de la máquina.

Además, este trabajo de fin de grado tiene como objeto presentar una reseña histórica del origen y evolución de la máquina de vapor, haciendo hincapié en la aparición e importancia de los diferentes tipos de válvulas que se fueron inventando para regular el flujo de vapor hacia el cilindro motor.

Por último, también se realizará una presentación y descripción del software utilizado para el modelado (CATIA V5), justificando su elección frente a las diferentes alternativas presentes hoy en día.



# Abstract

---

In this final degree thesis, a scale replica of a portable steam engine with piston valve will be modeled. Throughout the document, the process followed to model each of the parts that make up the steam engine will be detailed, then the different elements will be assembled until the final assembly is reached, and finally a rendering and animation of the steam engine will be performed.

In addition, this final degree thesis aims to present a review of the origin and evolution of the steam engine, emphasizing the appearance and relevance of the different types of valves that regulate the flow of steam into the cylinder.

Finally, the software used for modeling (CATIA V5) will be presented, and its choice of use will be justified and compared with the different alternatives present nowadays.



# ÍNDICE

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>7</b>
<b>Resumen</b>	<b>9</b>
<b>Abstract</b>	<b>11</b>
<b>Índice</b>	<b>13</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>17</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>19</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Objetivos</i>	1
<b>2 La máquina de vapor</b>	<b>3</b>
2.1 <i>Evolución histórica</i>	3
2.1.1 Primeros modelos	3
2.1.2 La máquina atmosférica de Thomas Newcomen (1712)	5
2.1.3 La máquina de vapor de James Watt (1765-1800)	6
2.1.4 La máquina de alta presión de Richard Trevithick (1797)	8
2.1.5 Desarrollo de válvulas reguladoras del flujo de vapor	9
2.1.6 La aparición de las máquinas de vapor portátiles	12
<b>3 CATIA V5</b>	<b>17</b>
3.1 <i>Módulos empleados</i>	17
3.1.1 Mechanical Design	17
3.1.2 Digital Mockup	19
3.2 <i>Alternativas a CATIA V5</i>	19
3.2.1 SolidWorks	20
3.2.2 Siemens NX	20
3.2.3 PTC Creo	20
3.3 <i>¿Por qué CATIA V5?</i>	21
<b>4 Modelado de piezas</b>	<b>23</b>
4.1 <i>Estructura base</i>	24
4.1.1 Wood base	24
4.1.2 Base plate	24
4.2 <i>Depósito de combustible y quemador</i>	24
4.2.1 Fuel tank and burner	25
4.2.2 Fuel tank cover	25
4.2.3 Fuel tank filler cap	26
4.3 <i>Cámara de combustión</i>	26
4.3.1 Fire box mantel	26
4.3.2 Fire box front plate	27
4.3.3 Fire box rear plate	28
4.3.4 Fire door ledge	29
4.3.5 Fire door	29
4.3.6 Fire door hinge pin	30
4.3.7 Fire door locking bracket	30
4.4 <i>Bloqueo del depósito de combustible</i>	30
4.4.1 Fuel tank security lock	30
4.4.2 Fuel tank security lock screw	31

4.5	<i>Caldera</i>	31
4.5.1	Boiler	31
4.5.2	Boiler bush Type-A M4x8x11	32
4.5.3	Boiler bush Type-B M5x10x14	32
4.5.4	Boiler bush Type-C M8x12x15	33
4.5.5	Boiler bush Type-D M8x10x15	33
4.5.6	Boiler bush Type-E M10x12x15	33
4.5.7	Boiler bush Type-F M10-15-15	34
4.5.8	Boiler supporting bar	34
4.5.9	Boiler water filler cap	34
4.5.10	Boiler heat insulation blanket	35
4.5.11	Boiler cladding	35
4.6	<i>Indicador de nivel de agua</i>	36
4.6.1	Water level gauge top body	36
4.6.2	Water level gauge bottom body	36
4.6.3	Water level gauge glass tube nut	37
4.6.4	Water level gauge glass tube	37
4.7	<i>Colector de escape</i>	38
4.7.1	Smoke box	38
4.7.2	Smoke box end ring	38
4.7.3	Smoke box door screw lock	39
4.7.4	Smoke box drain cap	39
4.8	<i>Chimenea</i>	40
4.8.1	Chimney base	40
4.8.2	Chimney	40
4.9	<i>Válvula de seguridad</i>	41
4.9.1	Safety valve – whistle base body	41
4.9.2	Safety valve ball valve	42
4.9.3	Safety valve spring	42
4.9.4	Safety valve spring tensioner	43
4.10	<i>Válvula de silbato</i>	43
4.10.1	Whistle valve base	43
4.10.2	Whistle tube	43
4.10.3	Whistle valve handle	44
4.11	<i>Bomba de agua (dummy)</i>	44
4.11.1	Dummy water feed pump housing	44
4.11.2	Dummy water feed pump mounting plate	45
4.11.3	Water pump ram	45
4.11.4	Water pump connection rod	46
4.12	<i>Base del motor</i>	46
4.12.1	Engine bed plate	46
4.13	<i>Soporte del cigüeñal</i>	46
4.13.1	Crank shaft bearing stand	46
4.13.2	Crank shaft bearing	47
4.14	<i>Válvula cilíndrica de alimentación</i>	48
4.14.1	Lower support port block	48
4.14.2	Steam supply valve spindle	48
4.14.3	Valve chest	49
4.14.4	Oil pot	51
4.14.5	Cylindrical slide valve	52
4.15	<i>Cilindro</i>	53
4.15.1	Cylinder	53
4.15.2	Cylinder front cover	53
4.15.3	Cylinder rear cover	54
4.16	<i>Tuberías y conexiones</i>	55

4.16.1	Steam supply elbow connector	55
4.16.2	Steam supply pipe	55
4.16.3	Steam supply pipe nut	56
4.16.4	Steam exhaust pipe Part-1	56
4.16.5	Steam exhaust pipe Part-2	57
4.17	<i>Mecanismo del motor</i>	57
4.17.1	Large gear wheel axle screw	57
4.17.2	Crankshaft	58
4.17.3	Flywheel	58
4.17.4	Eccentric sheave	60
4.17.5	Eccentric slip disc	61
4.17.6	Crankshaft gear wheel 24T	61
4.17.7	Pump crank gear wheel 60T	63
4.17.8	Pulley	63
4.17.9	Piston + rod	64
4.17.10	Connection rod	64
4.17.11	Cylindrical slide valve	65
4.17.12	Eccentric strap	65
<b>5</b>	<b>Ensamblaje</b>	<b>67</b>
5.1	<i>SA-1-101</i>	67
5.2	<i>SA-1-102</i>	67
5.3	<i>SA-1-103</i>	68
5.4	<i>SA-1-104</i>	69
5.5	<i>SA-1-105</i>	70
5.6	<i>SA-1-106</i>	71
5.7	<i>SA-1-107</i>	71
5.8	<i>SA-1-108</i>	72
5.9	<i>SA-1-109</i>	73
5.10	<i>SA-1-110</i>	74
5.11	<i>SA-1-114</i>	74
5.12	<i>SA-1-115</i>	75
5.13	<i>SA-2-201</i>	77
5.14	<i>SA-2-205</i>	78
5.15	<i>Renderizado</i>	80
<b>6</b>	<b>Animación</b>	<b>85</b>
<b>7</b>	<b>Conclusiones y desarrollos futuros</b>	<b>89</b>
7.1	<i>Conclusiones</i>	89
7.2	<i>Desarrollos futuros</i>	89
<b>8</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>11</b>





# ÍNDICE DE TABLAS

---

*Tabla 5: Lista de piezas del conjunto.*

23



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

<i>Figura 1: Esquema general de una máquina de vapor convencional [3].</i>	3
<i>Figura 2: Eopília de Herón [7].</i>	4
<i>Figura 3: Máquina de vapor de Denis Papin [9].</i>	4
<i>Figura 4: Máquina atmosférica de Thomas Newcomen [5].</i>	5
<i>Figura 5: Principio de funcionamiento de la máquina de vapor de Watt [5].</i>	7
<i>Figura 6: Máquina de Watt de doble batida con engranaje planetario [5].</i>	8
<i>Figura 7: Locomotoras a vapor diseñadas por Richard Trevithick [5].</i>	9
<i>Figura 8: Válvula deslizante [5], [11].</i>	10
<i>Figura 9: Válvula de pistón [5].</i>	11
<i>Figura 10: Válvula de Corliss [5].</i>	11
<i>Figura 11: Máquina de vapor portátil de un cilindro, fabricada por Paxman Portable Steam Engines &amp; Co [17].</i>	12
<i>Figura 12: Máquina de vapor portátil fabricada por Tuxford &amp; Sons, exhibida en el National Museums Collection Centre [18].</i>	13
<i>Figura 13: Logotipo de la empresa Davey, Paxman &amp; Co., Ltd. establecida en Colchester, Inglaterra [18].</i>	14
<i>Figura 14: Aplicación de la máquina de vapor para la excavación subterránea [19].</i>	15
<i>Figura 15: Máquina No. 15584 de Davey, Paxman &amp; Co. en su estado actual [18].</i>	15
<i>Figura 16: Representación de la máquina de vapor portátil modelada.</i>	16
<i>Figura 17: Entorno e interfaz de usuario CATIA V5R20.</i>	17
<i>Figura 18: Logotipo de SolidWorks [23].</i>	20
<i>Figura 19: Logotipo de Siemens NX [30].</i>	20
<i>Figura 20: Logotipo de PTC Creo [31].</i>	20
<i>Figura 21: Base de madera.</i>	24
<i>Figura 22: Placa base.</i>	24
<i>Figura 23: Depósito de combustible y quemadores.</i>	25
<i>Figura 24: Boceto de la parte plana de la cubierta.</i>	25
<i>Figura 25: Cubierta del depósito de combustible.</i>	26
<i>Figura 26: Tapón de rellenado del depósito de combustible.</i>	26
<i>Figura 27: Cubierta de la cámara de combustión.</i>	27
<i>Figura 28: Boceto de la placa frontal de la cámara de combustión.</i>	28
<i>Figura 29: Placa frontal de la cámara de combustión.</i>	28
<i>Figura 30: Placa trasera de la cámara de combustión.</i>	29
<i>Figura 31: Soporte del pestillo.</i>	29
<i>Figura 32: Compuerta abatible de la cámara de combustión.</i>	30
<i>Figura 33: Pasador de la bisagra.</i>	30
<i>Figura 34: Pestillo de bloqueo de la compuerta.</i>	30
<i>Figura 35: Pestillo de bloqueo del depósito de combustible.</i>	31

---

<i>Figura 36: Tornillo de bloqueo del pestillo.</i>	31
<i>Figura 37: Caldera.</i>	32
<i>Figura 38: Casquillo tipo A.</i>	32
<i>Figura 39: Casquillo tipo B.</i>	33
<i>Figura 40: Casquillo tipo C.</i>	33
<i>Figura 41: Casquillo tipo D.</i>	33
<i>Figura 42: Casquillo tipo E.</i>	34
<i>Figura 43: Casquillo tipo F.</i>	34
<i>Figura 44: Barra portante de la caldera.</i>	34
<i>Figura 45: Tapón de relleno de la caldera.</i>	35
<i>Figura 46: Aislamiento térmico de la caldera.</i>	35
<i>Figura 47: Revestimiento de la caldera.</i>	36
<i>Figura 48: Cuerpo superior del indicador de nivel de la caldera.</i>	36
<i>Figura 49: Cuerpo inferior del indicador de nivel de la caldera.</i>	37
<i>Figura 50: Tuerca del tubo del indicador.</i>	37
<i>Figura 51: Tubo de cristal del indicador de nivel.</i>	37
<i>Figura 52: Colector de escape.</i>	38
<i>Figura 53: Boceto de la tapa del colector de escape.</i>	38
<i>Figura 54: Anillo de unión del colector de escape.</i>	39
<i>Figura 55: Cierre roscado del colector de escape.</i>	39
<i>Figura 56: Tapón de drenaje del colector de escape.</i>	40
<i>Figura 57: Base de la chimenea.</i>	40
<i>Figura 58: Conducto de la chimenea y sombrerete.</i>	41
<i>Figura 59: Boceto para la obtención del sombrerete y pieza extruida.</i>	41
<i>Figura 60: Cuerpo de la válvula de seguridad y de la válvula de silbato.</i>	42
<i>Figura 61: Bola de acero de la válvula de seguridad.</i>	42
<i>Figura 62: Muelle de la válvula de seguridad.</i>	43
<i>Figura 63: Tensor del muelle de la válvula de seguridad.</i>	43
<i>Figura 64: Base de la válvula de silbato.</i>	43
<i>Figura 65: Campana de la válvula de silbato.</i>	44
<i>Figura 66: Manivela de la válvula de silbato.</i>	44
<i>Figura 67: Cuerpo de la bomba de agua.</i>	45
<i>Figura 68: Placa de montaje de la bomba de agua.</i>	45
<i>Figura 69: Ariete de la bomba de agua.</i>	45
<i>Figura 70: Barra de conexión de la bomba de agua.</i>	46
<i>Figura 71: Base del conjunto motor.</i>	46
<i>Figura 72: Boceto del soporte del cigüeñal.</i>	47
<i>Figura 73: Soporte del cigüeñal.</i>	47
<i>Figura 74: Rodamientos del cigüeñal.</i>	47
<i>Figura 75: Bloque inferior de la válvula de alimentación.</i>	48

<i>Figura 76: Manivela reguladora del flujo de vapor en el bloque inferior de la válvula.</i>	49
<i>Figura 77: Alojamiento del pistón en el cuerpo de la válvula.</i>	49
<i>Figura 78: Conducto de escape en el cuerpo de la válvula.</i>	50
<i>Figura 79: Conexión entre los conductos de admisión y escape con ambas cámaras del del cilindro.</i>	50
<i>Figura 80: Conductos de admisión hacia las cámaras del cilindro.</i>	50
<i>Figura 81: Conductos de escape hacia las cámaras del cilindro.</i>	51
<i>Figura 82: Conducto de cebado de la válvula.</i>	51
<i>Figura 83: Depósito de lubricante.</i>	51
<i>Figura 84: Tapón del depósito de lubricante.</i>	52
<i>Figura 85: Horquilla de la válvula cilíndrica.</i>	52
<i>Figura 86: Pasador de la válvula cilíndrica.</i>	52
<i>Figura 87: Cuerpo de la válvula cilíndrica.</i>	53
<i>Figura 88: Cuerpo principal del cilindro.</i>	53
<i>Figura 89: Tapa frontal del cilindro.</i>	54
<i>Figura 90: Tapón de la tapa frontal del cilindro.</i>	54
<i>Figura 91: Tapa trasera del cilindro.</i>	54
<i>Figura 92: Casquillo roscado de la tapa posterior.</i>	55
<i>Figura 93: Conector de alimentación de vapor.</i>	55
<i>Figura 94: Tubería de alimentación.</i>	56
<i>Figura 95: Boceto.</i>	56
<i>Figura 96: Tuerca de apriete.</i>	56
<i>Figura 97: Tubería de escape, tramo 1.</i>	57
<i>Figura 98: Tubería de escape, tramo 2.</i>	57
<i>Figura 99: Tornillo de fijación de la rueda dentada de 60 dientes.</i>	58
<i>Figura 100: Cigüeñal.</i>	58
<i>Figura 101: Sección transversal y aro exterior revolucionado.</i>	59
<i>Figura 102: Obtención de un radio mediante el comando Rib.</i>	59
<i>Figura 103: Modelo final de la rueda.</i>	60
<i>Figura 104: Roldana excéntrica.</i>	60
<i>Figura 105: Disco de arrastre de la excéntrica.</i>	61
<i>Figura 106: Boceto del perfil del diente.</i>	62
<i>Figura 107: Rueda dentada de 24 dientes.</i>	62
<i>Figura 108: Rueda dentada de 60 dientes.</i>	63
<i>Figura 109: Sección transversal y polea revolucionada.</i>	64
<i>Figura 110: Pistón, vástago, O-rings y enganche.</i>	64
<i>Figura 111: Biela del pistón.</i>	65
<i>Figura 112: Válvula cilíndrica y enganche.</i>	65
<i>Figura 113: Biela de la válvula cilíndrica.</i>	66
<i>Figura 114: Subconjunto SA-1-101.</i>	67
<i>Figura 115: Subconjunto SA-1-102.</i>	68

---

<i>Figura 116: Subconjunto SA-1-103.</i>	68
<i>Figura 117: Subconjunto SA-1-104.</i>	69
<i>Figura 118: Subconjunto SA-1-104, detalle de la bomba de agua.</i>	70
<i>Figura 119: Subconjunto SA-1-105.</i>	70
<i>Figura 120: Subconjunto SA-1-106.</i>	71
<i>Figura 121: Subconjunto SA-1-107.</i>	72
<i>Figura 122: Subconjunto SA-1-108.</i>	72
<i>Figura 123: Subconjunto SA-1-109.</i>	73
<i>Figura 124: Subconjunto SA-1-109, vista alternativa.</i>	74
<i>Figura 125: Subconjunto SA-1-110.</i>	74
<i>Figura 126: Subconjunto SA-1-114.</i>	75
<i>Figura 127: Subconjunto SA-1-115.</i>	76
<i>Figura 128: Subconjunto SA-1-115, detalle del conexionado de las tuberías.</i>	77
<i>Figura 129 : Subconjunto SA-2-201.</i>	77
<i>Figura 130 : Subconjunto SA-2-201, vista cenital.</i>	78
<i>Figura 131: Subconjunto SA-2-205.</i>	78
<i>Figura 132: Subconjunto SA-2-205.</i>	79
<i>Figura 133: Subconjunto SA-2-205, detalle ampliado de las partes móviles del motor.</i>	80
<i>Figura 134: Imagen renderizada en perspectiva 1.</i>	81
<i>Figura 135 : Imagen renderizada en perspectiva 2.</i>	82
<i>Figura 136 : Imagen renderizada en perspectiva 3.</i>	82
<i>Figura 137: Creación del mecanismo Freedom y fijación del subconjunto SA-1-115.</i>	85
<i>Figura 138: Revolute Joint entre el cigüeñal y sus rodamientos.</i>	85
<i>Figura 139: Revolut Joint entre la cabeza de la biela y el pin de la excéntrica.</i>	86
<i>Figura 140: Revolute Joint entre rodamiento y pasador.</i>	86
<i>Figura 141: Cylindrical Joint entre pistón y cilindro.</i>	86
<i>Figura 142: Revolute Joint entre rodamiento y bulón.</i>	87
<i>Figura 143: Gear Joint entre ruedas dentadas.</i>	87







# 1 INTRODUCCIÓN

---

El presente Trabajo de Fin de Grado abarca el estudio, modelado y simulación de una máquina de vapor haciendo uso de software CAD. La máquina elegida tiene la peculiaridad de ser portátil y de regular el flujo de vapor mediante una válvula cilíndrica (o de pistón).

En primer lugar, se realizará un estudio de la evolución histórica y aplicaciones de la máquina de vapor, resaltando su vital importancia en el desarrollo de la industria moderna y la revolución que supuso en numerosos medios de transporte. A lo largo de esta reseña histórica, se hará hincapié en la aparición y aplicaciones de las máquinas de vapor portátiles, así como en el desarrollo y ventajas de las válvulas de pistón frente a las primeras válvulas deslizantes.

A continuación, se presentará la metodología CAD (*Computer Aided Design*) empleada en la realización del presente proyecto. Tras la presentación, se propondrán diferentes herramientas CAD ampliamente extendidas en la industria moderna, pudiendo ser cualquiera de ellas válidas para la realización del modelado que nos ocupa. Una vez justificada la elección de la herramienta CATIA V5 frente a algunas de sus competidoras, se realizará una descripción detallada de los principales módulos utilizados durante la realización del proyecto.

Seguidamente se procederá a modelar cada una de las piezas que componen la máquina de vapor, detallando para cada una de ellas los comandos utilizados en la herramienta CATIA V5. Para ello, se partirá de los planos obtenidos de [1]. Una vez generadas todas las piezas, se dará paso al proceso de ensamblado, en el que se irán generando diferentes subconjuntos hasta obtener la máquina de vapor final. El modelado finalizará con una simulación virtual en la que se recreará el movimiento de las partes móviles más relevantes de la máquina.

Por último, se presentarán las conclusiones obtenidas tras la realización del trabajo. Junto a ellas, se propondrán también posibles desarrollos futuros que tuvieran como punto de partida el modelado de este trabajo fin de grado.

## 1.1 Objetivos

Los principales objetivos de este trabajo fin de grado pueden dividirse en los siguientes puntos:

- Resaltar la importancia de la aparición y constante evolución de las máquinas térmicas en el desarrollo industrial y de los medios de transporte. Se hará también hincapié en el desarrollo de las máquinas de vapor portátiles y en la aparición de los diferentes tipos de válvulas que fueron apareciendo para regular el flujo de vapor en este tipo de máquinas térmicas.
- Presentar algunas de las herramientas de modelado disponibles en la industria actual, exponiendo las diferencias y características principales de cada una de ellas. De la herramienta elegida para la realización de este proyecto (CATIA V5) se detallarán además los módulos y comandos utilizados.
- Presentar el proceso de modelado y simulación de una réplica a escala de una máquina de vapor mediante CATIA V5, detallando la metodología seguida para modelar cada una de las piezas y para ensamblar los diferentes conjuntos. También se pretende, mediante el proceso de simulado, ilustrar detalladamente el funcionamiento del conjunto y de sus piezas más importantes.



## 2 LA MÁQUINA DE VAPOR

La máquina de vapor es un motor de combustión externa que permite transformar la energía del vapor de agua en trabajo mecánico [2].

En primer lugar, el vapor de agua se obtiene calentando una caldera hermética llena de agua mediante la quema de un combustible (típicamente carbón o madera). Una vez generado, el flujo de vapor de agua es regulado por una serie de válvulas (de entrada, salida, alivio, etc.), y dirigido a un cilindro en cuyo interior se encuentra un pistón. En su expansión dentro del cilindro, el vapor de agua arrastra el pistón, que mediante un mecanismo de biela-manivela traduce su movimiento lineal en un movimiento rotacional. Cuando el pistón alcanza el final de carrera, el propio mecanismo de biela-manivela lo hace retornar a su posición inicial debido a la acción de un volante de inercia. Durante este retorno, el pistón expulsa el vapor de agua del cilindro, dando paso al comienzo de un nuevo ciclo repetitivo [2], [3].

En la siguiente figura se ilustra el funcionamiento de una máquina de vapor convencional.

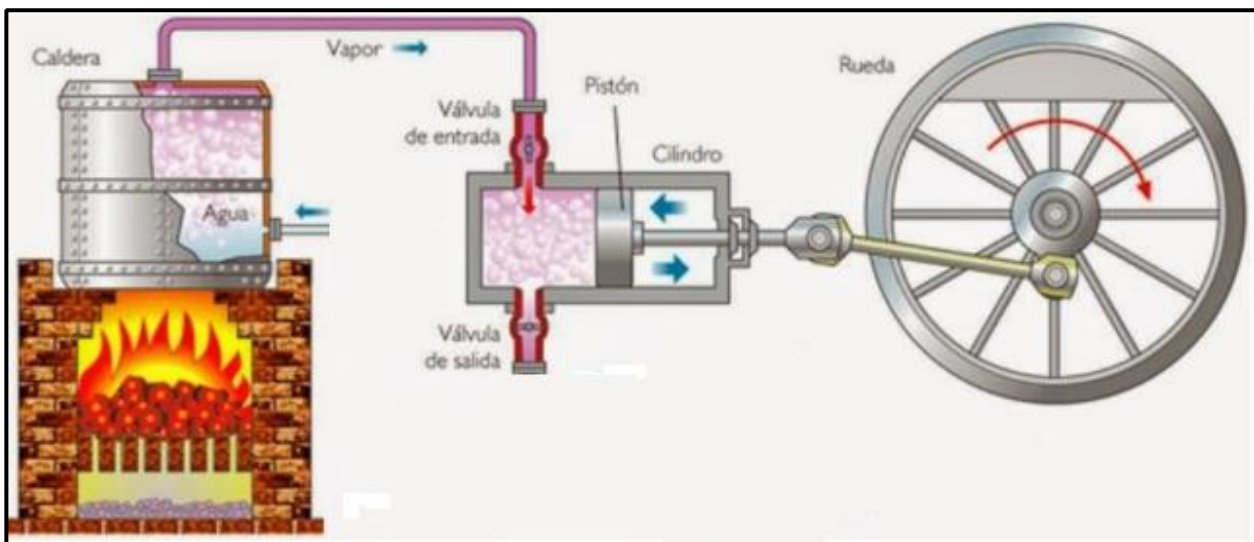


Figura 1: Esquema general de una máquina de vapor convencional [3].

### 2.1 Evolución histórica

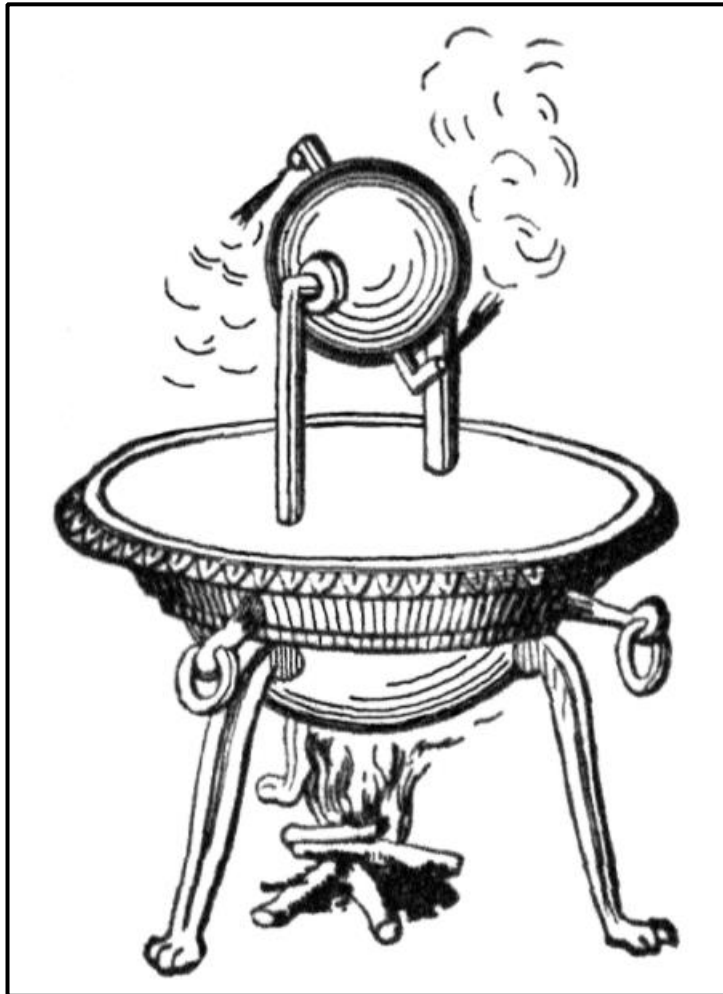
Los primeros registros conocidos sobre la máquina de vapor datan del siglo I d.C. Sin embargo, hasta el siglo XVIII no aparecerían los diferentes tipos de máquinas de vapor convencionales, asumiendo un rol protagonista en el desarrollo de la revolución industrial [4].

Aunque fueron muchas las personas que (en mayor o menor medida) contribuyeron a la aparición y desarrollo de la máquina de vapor, es habitual caracterizar su evolución histórica mediante las invenciones de Thomas Newcomen, James Watt y Robert Trevithick [5].

#### 2.1.1 Primeros modelos

En el siglo I d.C., el ingeniero y matemático Herón de Alejandría (provincia romana de Egipto en aquella época) documentó en su manuscrito *Spiritualia seu Pneumatica* la Eolípila [6].

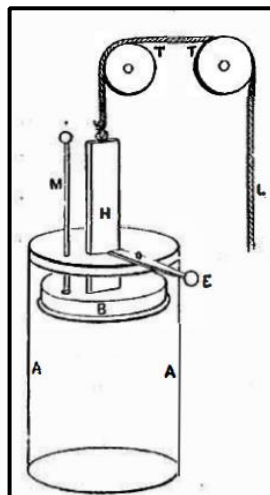
Esta invención constaba de un depósito cerrado de agua, que se calentaba mediante la quema externa de madera. De la parte superior del depósito sobresalían dos tubos huecos que conectaban con una esfera hueca con dos tubos que permitían expulsar el vapor de agua en direcciones contrapuestas, haciendo girar la esfera [7].



*Figura 2: Eolipila de Herón [7].*

Cabe destacar que, a pesar de ser considerada la primera máquina térmica de la historia, durante mucho tiempo no fue estudiada científicamente, sirviendo únicamente como juguete o entretenimiento [7].

Denis Papin (1647-1712), un inventor y físico francés que trabaja para la *Royal Society* de Londres, documentó en 1695 el primer modelo de una máquina de vapor operada por la presión atmosférica [8], [9].



*Figura 3: Máquina de vapor de Denis Papin [9].*

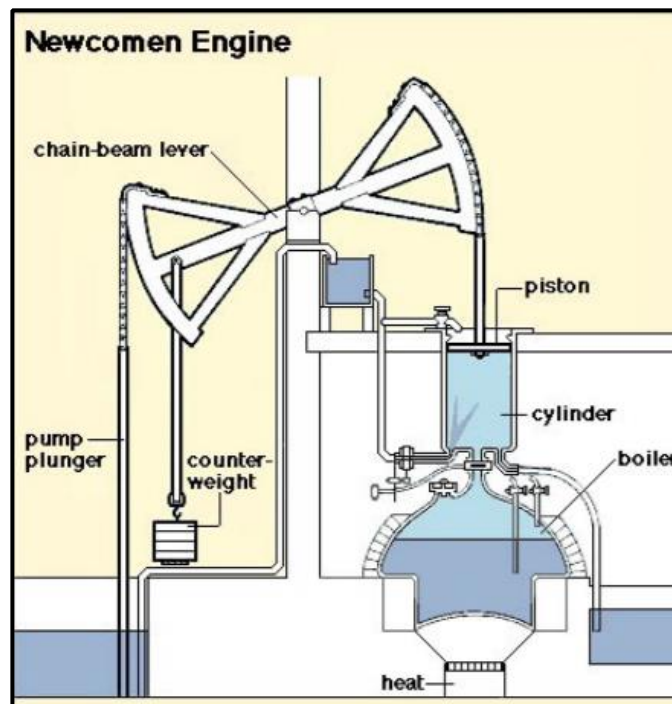
Papin propuso introducir una pequeña cantidad de agua dentro de un cilindro (A), cuya base debía ser muy fina [9]. Al aplicar calor bajo el cilindro, se forma vapor de agua en su interior, lo que provoca que el pistón (B) ascienda hasta ser bloqueado en su posición superior por un pasador o pestillo (E). Llegados a este punto, se fija una carga que quiera ser levantada (L), se retira la fuente de calor bajo el cilindro y se libera el pasador de bloqueo del pistón (E). Al retirar la fuente de calor, el vapor de agua se condensa dentro del cilindro, generando vacío. Esto, a su vez, causa que el pistón descienda bajo la acción de la presión atmosférica, levantando el peso (L) a través de las dos poleas (T) [9].

Este modelo tenía un cilindro de dos pulgadas y media de diámetro, y era capaz de levantar 60 libras cada minuto; Papin calculó que una máquina de poco más de dos pies de diámetro y cuatro pies de batida del pistón sería capaz de levantar una carga de 8,000 libras a unos 4 pies de altura cada minuto (el equivalente a generar un caballo de potencia) [9].

### 2.1.2 La máquina atmosférica de Thomas Newcomen (1712)

Thomas Newcomen (1663-1729) fue un herrero e inventor nacido en Darmouth, Inglaterra. Es frecuentemente nombrado como uno de los precursores de la revolución industrial [8].

En 1712, Newcomen (junto con su socio Thomas Savery, que había patentado en 1698 una bomba de vapor), construyó una máquina de vapor atmosférica con el propósito de utilizarla para bombear agua fuera de las minas de carbón y estaño existentes en el suroeste de Inglaterra [10].



**Figura 4: Máquina atmosférica de Thomas Newcomen [5].**

Como puede observarse en la figura anterior, se utiliza una fuente de calor para calentar agua en un depósito aislado térmicamente. Este calentamiento provoca la aparición de vapor de agua, que asciende hacia el cilindro que se encuentra sobre el depósito. El pistón del cilindro asciende, no por la acción del vapor (que se esencialmente se encuentra a presión atmosférica), sino por el tirón hacia abajo de la barra rígida contrapesada que desciende por el pozo de drenaje, conectada al extremo izquierdo del balancín. Cuando el pistón alcanza el tope superior, se corta el suministro de vapor y se inyecta agua en el cilindro. Esto provoca que el vapor de agua se condense y cree vacío, de modo que la propia presión atmosférica empuja el pistón hacia abajo, levantando la barra rígida que bombea el agua. Inicialmente las aperturas y cierres de las válvulas que gobiernan los flujos de vapor y agua se hacían manualmente, pero al cabo de unos pocos años se consiguió mecanizarlas usando los propios movimientos e inercias de la máquina.

Las máquinas de Newcomen eran de grandes dimensiones, lentas y poco eficientes, pero potentes para la época,

por lo que fueron ampliamente aceptadas. Las primeras máquinas contaban con un cilindro de 53 cm de diámetro, y eran capaces de generar 3-4 batidas del pistón por minuto, generando alrededor de 4 kW de potencia. Mediante sucesivas mejoras a lo largo de los años, se llegaron a fabricar máquinas con cilindros de 1.8 m de diámetro y 2.1 m de batida, capaces de generar hasta 12 batidas por minuto. Estas máquinas llegaban a entregar hasta 56 kW de potencia, al menos cinco veces más de lo que entregaba un buen molino de agua [5].

Se calcula que unas 120-130 máquinas de Newcomen fueron fabricadas hasta 1770, y unas 1000 hasta 1853. La primera fabricación fuera de Inglaterra tuvo lugar en Bélgica en 1721, mientras que las primeras fabricadas en Estados Unidos datan de 1753-55 [5].

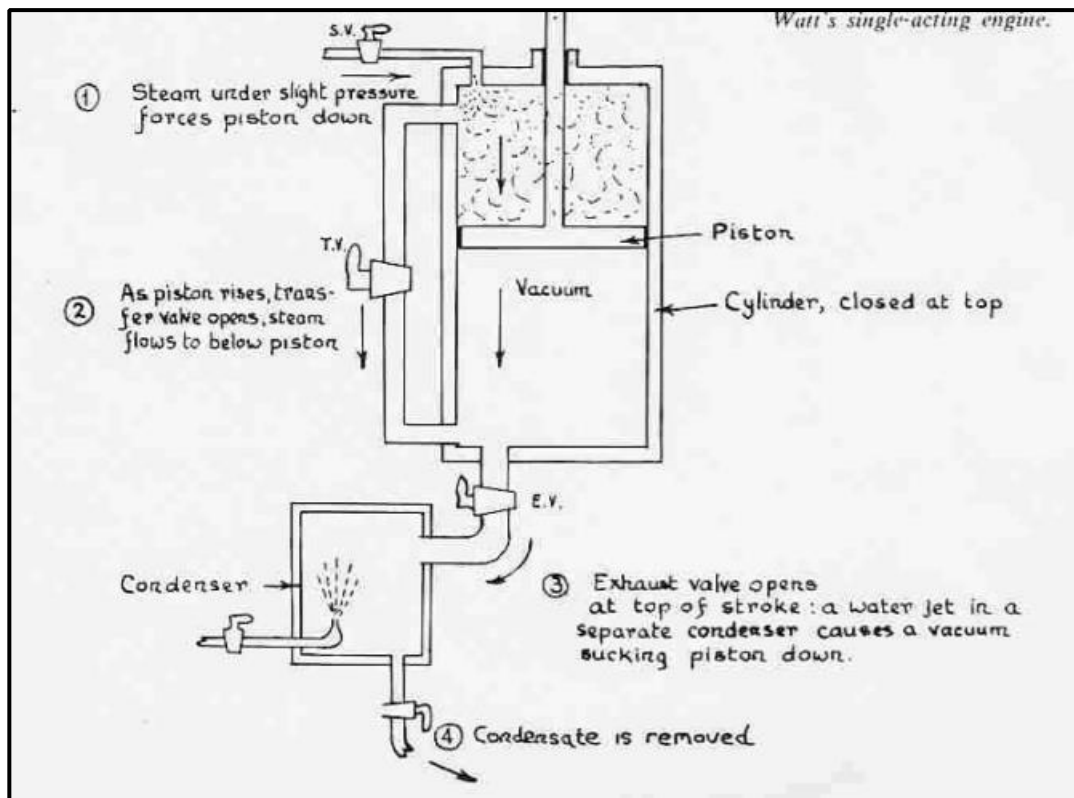
### 2.1.3 La máquina de vapor de James Watt (1765-1800)

Con bastante frecuencia se suele atribuir a James Watt (1736-1819) la invención de la máquina de vapor. Tal y como se ha podido ver en apartados anteriores, esta atribución es errónea. Sin embargo, James Watt desarrolló a lo largo de los años una serie de mejoras y extensiones de gran relevancia, logrando que sus máquinas sustituyesen a modelos anteriores y alcanzando por ello un merecido reconocimiento mundial [5], [8].

James Watt ejercía como instrumentista en la Universidad de Glasgow cuando en 1763 reparó un modelo de una máquina de Newcomen para utilizarlo en una de sus clases. Watt no quedó satisfecho con el rendimiento del modelo, y llevó a cabo una serie de experimentos sobre varios aspectos de la máquina, las propiedades del vapor y la interacción entre vapor y agua líquida. Rápidamente se dio cuenta de que una de las causas de la baja eficiencia de la máquina de Newcomen era el enorme consumo de vapor derivado del continuo enfriamiento y calentamiento del cilindro. Para subsanar este problema, Watt introdujo el concepto del condensador separado, en el que el cilindro se mantenía siempre caliente y el condensador se mantenía siempre frío. Abriendo una válvula, el vapor que se encontraba debajo del pistón se veía forzado a fluir hacia el vacío de la cámara de condensación, permitiendo la bajada del pistón sin que se produjese un cambio de temperatura en el cilindro [5].

Además, Watt cerró el cilindro en su parte superior, dejando únicamente el hueco necesario para alojar la barra del pistón. Por encima del pistón, usó vapor de agua a una presión ligeramente superior a la atmosférica, creando así la primera máquina que usaba el propio vapor como medio de trabajo (en la máquina de Newcomen era la atmósfera la que realizaba el trabajo sobre el pistón). El uso de vapor como medio de trabajo facilitaba también que el cilindro se mantuviese caliente [5].

El principio de funcionamiento de la máquina de Watt se ilustra en la siguiente figura.



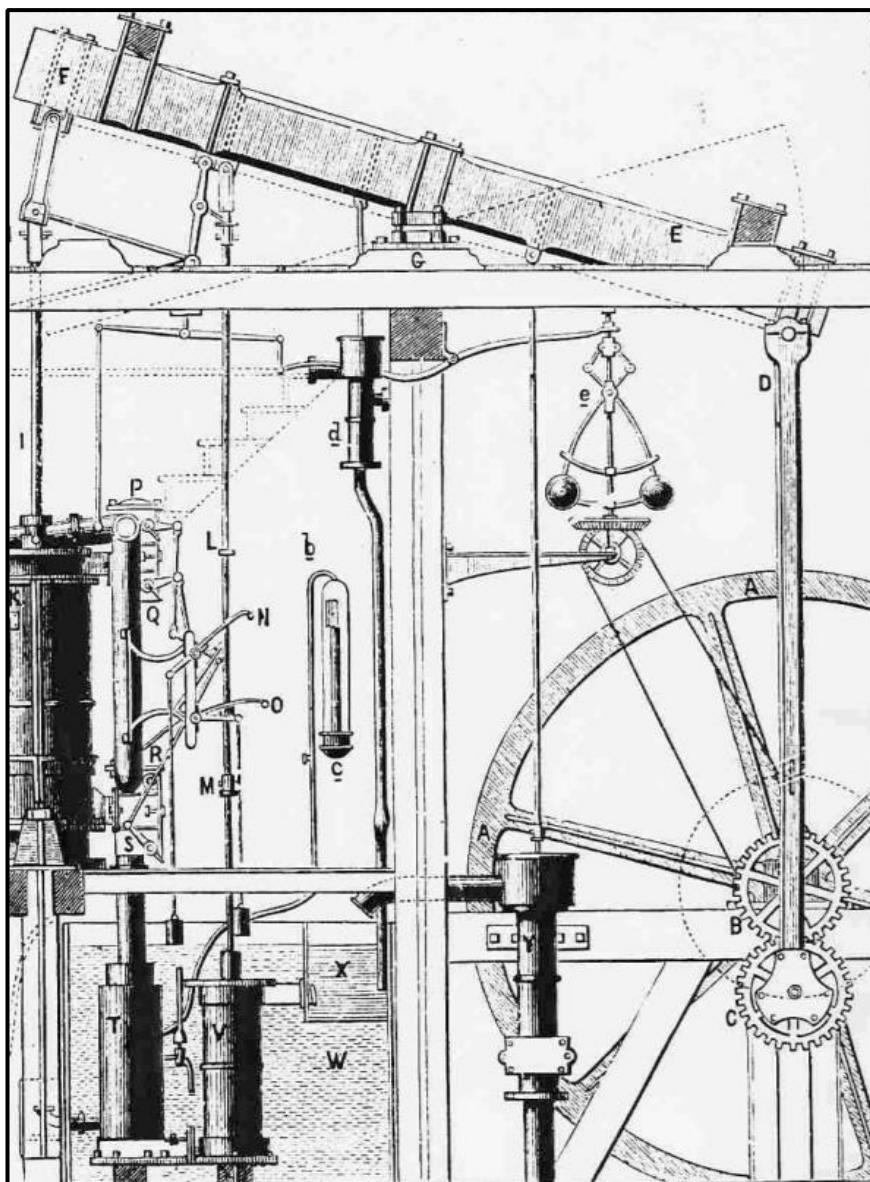
**Figura 5: Principio de funcionamiento de la máquina de vapor de Watt [5].**

Watt realizó un modelo de esta máquina en 1765 y obtuvo la patente en 1769, incluyendo también el uso de una bomba para evacuar el agua y el aire del condensador. Sin embargo, los primeros intentos de fabricar esta máquina resultaron infructuosos, y Watt tuvo que esperar hasta 1774-75 para asociarse con Matthew Boulton, quien se encargó de la financiación. No fue hasta el año 1777 cuando Watt consiguió construir la primera máquina a escala real [11].

Cabe recalcar que esta primera máquina de Watt sigue siendo de batida simple, es decir, el pistón solo produce trabajo cuando es empujado hacia abajo. El siguiente invento de Watt llegaría en 1782 y sería la máquina de doble batida, en la que el pistón produce trabajo en ambos recorridos (hacia arriba y hacia abajo). Esto se conseguía permitiendo que el vapor fluyera hacia el condensador desde cualquiera de las cámaras del cilindro, e inyectando simultáneamente vapor fresco en la cámara contraria. Las máquinas de doble batida no tenían aplicación en el bombeo de agua, pero resultaban idóneas para generar movimientos rotativos [11].

Dada la creciente demanda de máquinas que generasen movimientos rotativos, Watt ideó de nuevo un mecanismo para transformar el movimiento de batida del pistón en un movimiento de rotación (la biela ya había sido inventada y patentada, pero Watt no estaba dispuesto a pagar las correspondientes tasas). Junto a su asociado William Murdoch, Watt inventó el engranaje planetario, obteniendo la patente en 1781 [5].

Con el desarrollo de la máquina de doble batida, era necesario evolucionar también la unión entre pistón y balancín, ya que la unión por cadena flexible que se utilizaba previamente no permitía la transferencia de potencia en el movimiento ascendente del pistón. Este problema lo resolvió Watt con una de sus más famosas invenciones, la conexión por paralelogramo, que se puede observar en la siguiente figura, bajo el extremo izquierdo del balancín [5].



**Figura 6: Máquina de Watt de doble batida con engranaje planetario [5].**

Nótese que la rueda dentada (C) está unida solidariamente a la barra (D). Esto provoca que sea la rueda (B) la que gire sobre su eje, exactamente dos rotaciones completas por cada batida del pistón (arriba y abajo). Además, esta máquina conseguía trabajar a velocidad constante gracias al regulador centrífugo (e) [5].

A pesar del claro éxito de la tecnología, la firma Boulton & Watt no logró obtener beneficios hasta 1785, punto a partir del cual la empresa se volvió rentable y dominante. Para 1800, cuando venció su primera patente, Boulton & Watt había fabricado 496 máquinas de vapor. Los valores de potencia típicos de estas máquinas variaban entre los 5-10 kW, con eficiencias alrededor del 2-3% [5].

#### 2.1.4 La máquina de alta presión de Richard Trevithick (1797)

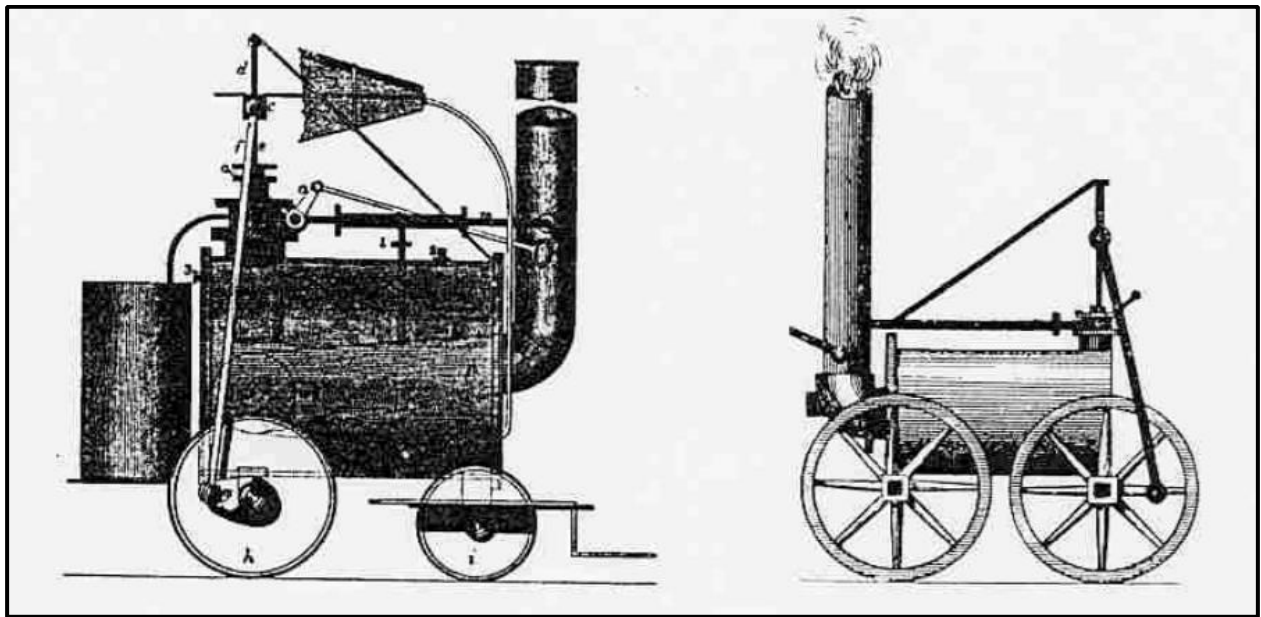
Durante mucho tiempo se reconoció que el uso de vapor a alta presión sería muy beneficioso para obtener mayores potencias y eficiencias, pero la investigación y el desarrollo de maquinarias capaces de trabajar a altas presiones resultaba muy peligroso con los materiales y técnicas disponibles en aquella época [5].

En 1797, el ingeniero inglés Richard Trevithick (1771-1833) realizó el primer modelo de una máquina estacionaria de vapor a alta presión, así como el primer modelo de locomotora de vapor. En 1801 consiguió construir la primera locomotora de vapor a escala real, que según estimaciones pudo trabajar en torno a los 3 bares de presión y estaba destinada para su uso en carretera. En 1803, consiguió construir otra máquina estacionaria y otra locomotora, esta vez utilizando presiones de hasta 10 bares. El hervidor de esta máquina



estaba fabricado en hierro fundido, con paredes de 4 cm de grosor. El cilindro tenía 18 cm de diámetro y una batida de 0.9 m. El uso de vapor a alta presión permitió a Trevithick eliminar el condensador y el balancín y otros mecanismos que dejaron de ser necesarios, logrando una máquina compacta con claras aplicaciones en el transporte. En 1804 consiguió construir la primera locomotora ferroviaria, capaz de remolcar cinco vagones, con una carga total de diez toneladas (más 70 hombres en el viaje inaugural) durante 16 km, a una velocidad media de 4 km/h [5], [12].

En la siguiente figura se muestran los bocetos de las primeras locomotoras desarrolladas por Trevithick: a la izquierda, la locomotora de carretera de 1801, y a la derecha la locomotora ferroviaria de 1804.



*Figura 7: Locomotoras a vapor diseñadas por Richard Trevithick [5].*

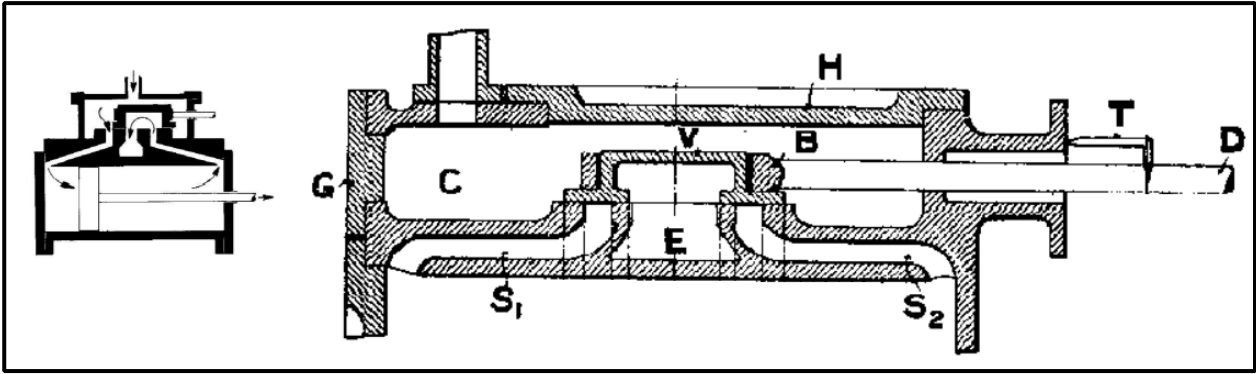
### 2.1.5 Desarrollo de válvulas reguladoras del flujo de vapor

Dado que la fuerza motriz de las máquinas de vapor se generaba dentro del cilindro debido a la interacción entre el vapor de agua y el pistón, se deduce inmediatamente la relevancia de los elementos que regulan el flujo de vapor en el cilindro (admisión y escape). En el esquema más representativo de las máquinas de vapor típicas, el flujo estaba gobernado por una sola válvula encargada de regular la admisión y escape del vapor de agua, junto con otra válvula de alivio que liberaba vapor en caso de sobrepresión. Así, el desarrollo de mejores válvulas gobernadoras jugó, a lo largo de los años, un papel fundamental en la evolución de las máquinas de vapor.

Las primeras válvulas no eran más que meros tapones (como el que podemos encontrar hoy en día en un lavabo o fregadero convencional). Rápidamente se hizo patente la necesidad de desarrollar nuevas válvulas, puesto que estos tapones no permitían una operación precisa, especialmente a medida que se aumentaba la presión del flujo de vapor [5].

#### 2.1.5.1 Válvula deslizante

Un operario de taller de la firma Boulton & Watt inventó la válvula deslizante en la década de 1770, e inmediatamente se aplicó a las máquinas de vapor fabricadas por la firma [5]. En la siguiente imagen se muestra un esquema simplificado de un cilindro gobernado por una válvula deslizante (izquierda), así como un detalle seccional de una válvula deslizante (derecha), que ilustra en profundidad sus diferentes partes.



*Figura 8: Válvula deslizante [5], [11].*

El vapor de agua, proveniente del hervidor, entra en el cuerpo de la válvula (C) por el conducto vertical que se observa en la parte superior izquierda. La válvula deslizante (V) tiene forma de caja hueca invertida, siendo sus superficies de contacto planas en las caras inferiores. Estas superficies permiten que la válvula pueda deslizarse de izquierda a derecha sobre los puertos que conectan con las dos cámaras del cilindro (S1 y S2) sin que existan fugas. El deslizamiento de la válvula está provocado por el movimiento de la barra excéntrica (D), que se une a la propia válvula mediante una horquilla (B). La barra excéntrica sale del cuerpo de la válvula a través de una apertura; es necesario instalar un sello alrededor de la barra para hacer la apertura estanca y que el vapor no escape al exterior durante los deslizamientos [13].

Cuando la válvula se desplaza hacia la derecha, deja al descubierto el puerto S1, permitiendo el flujo de vapor hacia la cámara izquierda del cilindro, a la vez que conecta el puerto S2 con el conducto de escape, permitiendo que el vapor existente en la cámara derecha del cilindro sea evacuado. Estas dos acciones simultáneas provocan el desplazamiento del pistón a hacia la derecha [13].

En un punto determinado durante la batida del pistón (comúnmente denominado punto de corte), la válvula retorna a su posición central, cubriendo de nuevo el puerto S1 y cortando así el suministro de vapor a la cámara izquierda. A pesar de cortarse el suministro, el vapor existente en la cámara izquierda continúa expandiéndose, desplazando el pistón hasta alcanzar el final de carrera [13].

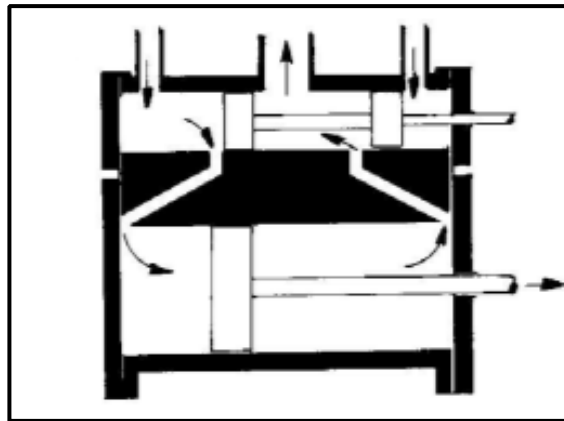
Llegado a este punto, la válvula se desplaza hacia la izquierda, dejando al descubierto el puerto S2 y permitiendo así el flujo de vapor hacia la cámara derecha, a la vez que conecta el puerto S1 con el conducto de escape, repitiéndose así el ciclo en sentido contrario [13].

### 2.1.5.2 Válvula de pistón

La siguiente evolución de la válvula deslizante fue la válvula de pistón, que se volvió común y fue sustituyendo progresivamente a la deslizante a partir de 1900 [5]. La válvula de pistón tuvo una aplicación predominante en motores que usaban vapor sobrecalentado, debido a dos razones fundamentales [14]:

- Resultaba especialmente complicado lubricar válvulas deslizantes cuando se usaba vapor sobrecalentado, dando lugar a desgastes prematuros que provocaban fugas, con las consecuentes pérdidas de eficiencia.
- Con la aparición de las válvulas de pistón, los conductos por los que fluía el vapor podían acortarse, reduciéndose así la resistencia al flujo de vapor y mejorándose la eficiencia.

En esencia, la válvula de pistón opera de la misma manera que una deslizante. Sin embargo, en lugar de tener forma de caja hueca, está formada por dos cabezas de pistón unidas en un eje común que desliza a lo largo del cuerpo de la válvula, tal y como puede verse en la siguiente figura.



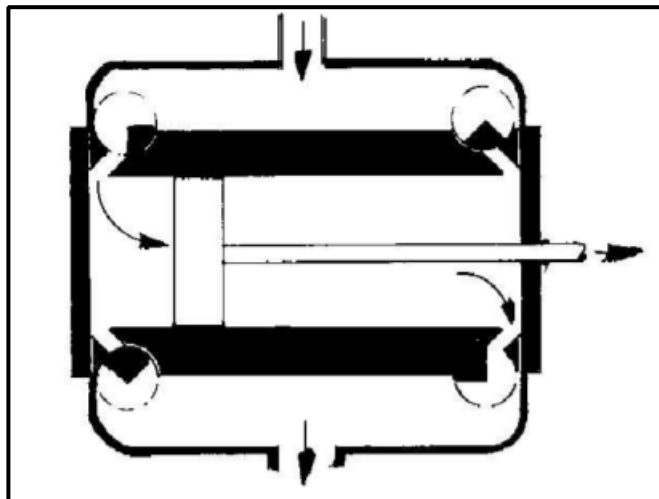
**Figura 9: Válvula de pistón [5].**

Como se observa en la figura, en el diseño típico de una válvula de pistón cada cámara del cilindro motor se alimenta de vapor por un conducto independiente, a diferencia de la válvula deslizante (existen dos configuraciones: suministros independientes y escape común y viceversa).

### 2.1.5.3 Válvula de Corliss

Este tipo de válvula fue inventada por el ingeniero estadounidense George Henry Corliss (Providence, Rhode Island) en 1849 [15]. Su invención introducía 4 válvulas rotatorias dentro del cilindro; dos para controlar el cebado hacia ambas cámaras del cilindro y otras dos para controlar el escape. Los motores equipados con válvulas de Corliss ofrecían eficiencias térmicas superiores a cualquier otro tipo de máquinas de vapor estacionarias.

La principal ventaja de la válvula de Corliss se consigue al separar las válvulas de admisión y escape; esto significa que ni las válvulas ni los pasos de vapor entre los cilindros y las válvulas necesitan cambiar la temperatura durante el ciclo de empuje y escape, logrando una evidente mejora en la eficiencia térmica del Sistema [5].



**Figura 10: Válvula de Corliss [5].**

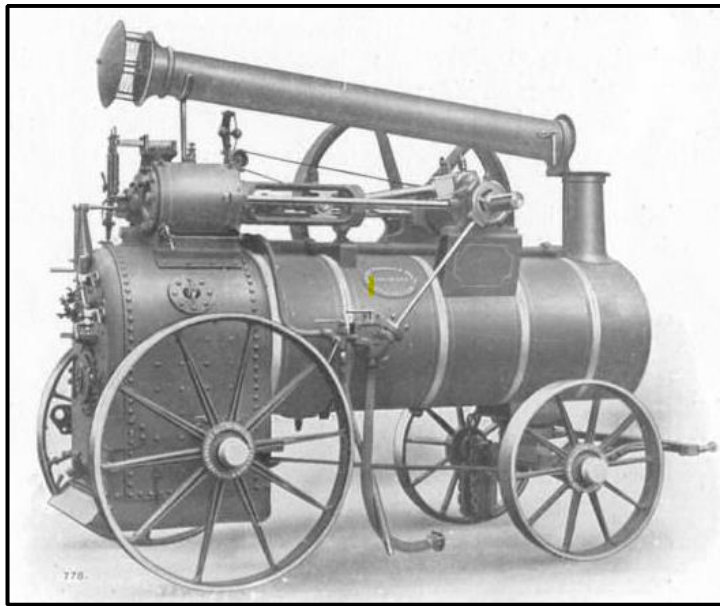
En su configuración más extendida, las válvulas de Corliss tenían forma cilíndrica y se accionaban por una muñequera excéntrica común [15].

### 2.1.6 La aparición de las máquinas de vapor portátiles

La máquina de vapor portátil se caracteriza por poder ser utilizada en diferentes localizaciones, dependiendo de las necesidades del operador. En su configuración más característica y extendida, la máquina se montaba sobre cuatro ruedas y era remolcada por caballos o bueyes [16].

Desde su invención en 1839 hasta su cese de producción en los años posteriores a la Segunda Guerra Mundial, se fabricaron más unidades de máquinas de vapor portátiles que del resto de máquinas combinadas (estacionarias, tractoras, etc.) [17].

Una máquina de vapor portátil, a diferencia de una tractora, no puede moverse por sí misma, y como se ha comentado anteriormente, se movía entre ubicaciones remolcada por caballos. Los tamaños podían variar, en función de las aplicaciones, desde pequeñas máquinas de una tonelada hasta potentes máquinas de más de 20 toneladas [17].

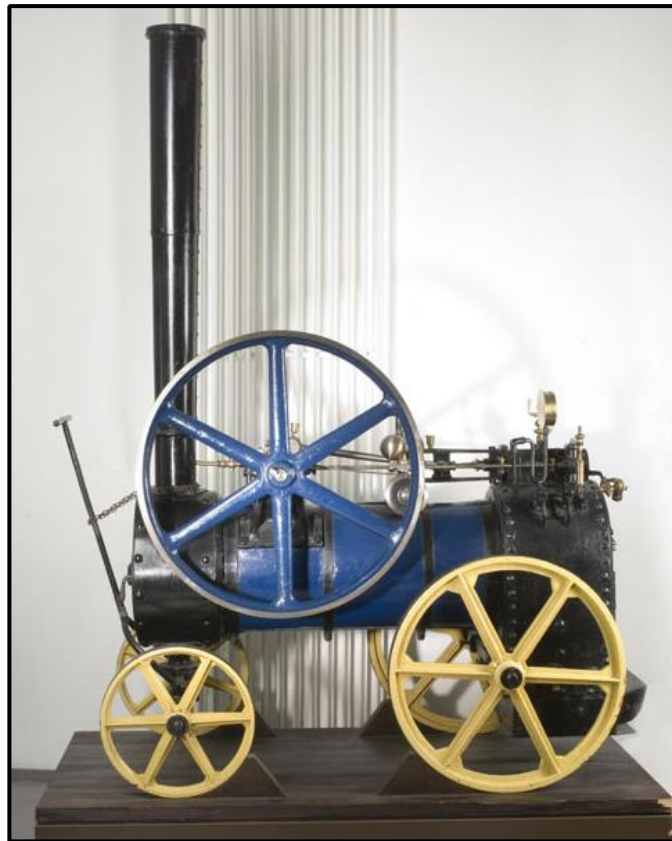


*Figura 11: Máquina de vapor portátil de un cilindro, fabricada por Paxman Portable Steam Engines & Co [17].*

Las máquinas portátiles gozaron de gran popularidad en los países industrializados entre principios del siglo XIX y principios del XX. Fueron principalmente utilizadas en agricultura (para accionar molinos, trillas, sierras, etc.), aunque también fueron usadas en industria (para accionar martillos, prensas, etc.) y para generar electricidad en situaciones de necesidad [16].

Fue William Tuxford (Boston, Lincolnshire) quien fabricó la primera máquina de vapor portátil en 1839. Esta máquina presentaba una caldera horizontal, con un solo cilindro y un cigüeñal, montados sobre la caldera. Todo el conjunto estaba a su vez montado sobre cuatro ruedas, siendo las dos delanteras dirigibles. Al cigüeñal se acoplaba una gran rueda de inercia, encargada de accionar la maquinaria deseada mediante una correa de cuero [16].

Aunque numerosos fabricantes comenzaron a producir máquinas portátiles en los siguientes años, los fabricantes ingleses localizados en Lincoln e Ipswich fueron los más afamados, y el diseño y configuración de la primera máquina de Tuxford se mantuvo como el estándar predominante [17], [18].



**Figura 12: Máquina de vapor portátil fabricada por Tuxford & Sons, exhibida en el National Museums Collection Centre [18].**

Como puede observarse en la imagen anterior, el diseño de Tuxford posiciona el cilindro sobre la cámara de combustión, mientras que el cigüeñal va montado junto al colector de escape. Esta disposición favorecía que el operador de la máquina pudiera controlar el fuego y regular la velocidad del motor desde una misma posición [16]. La cámara de combustión era de tipo colonial, y estaba pensada para usar carbón como combustible, aunque también se podía utilizar madera o paja [16]. La chimenea presentaba un mecanismo de bisagra en su parte inferior, permitiendo el plegado de esta durante su transporte y almacenamiento [16]. Por último, la máquina de Tuxford solía incorporar unos engranajes auxiliares en el cigüeñal para accionar una bomba de ariete que permitía alimentar la caldera desde un depósito de agua externo ubicado junto a la máquina [16].

Las características técnicas de las máquinas de vapor portátiles variaban en función de su tamaño (muchos de los modelos se realizaban por encargos directos de los clientes conforme a sus necesidades), llegando a proporcionar entre 1,5 y 12 caballos de potencia y trabajando con presiones en torno a los 8 bares [17], [18], [19].

Una vez presentadas las máquinas de vapor portátiles y sus principales características, puede que a primera vista no resulte evidente que la máquina modelada en este trabajo fin de grado pertenezca a este grupo, al encontrarse la cámara de combustión unida solidariamente a una base de madera. Sin embargo, es importante recalcar que los planos [1] utilizados para el modelado están diseñados para la fabricación doméstica de una réplica a escala, indudablemente inspirada en el diseño de las máquinas predominantes del siglo XIX.

Aunque el autor de los planos [1] no hace referencia alguna a un modelo concreto en el que esté inspirada la réplica, durante el proceso de búsqueda de información histórica se ha intentado establecer alguna conexión fundada con algún ejemplar concreto, en pos de conocer el detalle de sus características originales.

### 2.1.6.1 Davey, Paxman & Co., Ltd. – EGINE No 15584

Como se ha comentado en el párrafo anterior, uno de los objetivos de la reseña histórica es el de establecer una conexión coherente entre la réplica modelada y una máquina de vapor portátil manufacturada durante el siglo XIX. Tras llevar a cabo un extenso proceso de investigación, se consiguió encontrar un modelo concreto con similares proporciones y características.

Dicho modelo fue fabricado por la empresa *Davey, Paxman & Co., Ltd.* en Colchester, Inglaterra. La compañía fue fundada en 1865 por James Noah Paxman, en sociedad con los hermanos Henry y Charles Davey, bajo el nombre *Davey, Paxman & Davey, Engineers*. Comenzaron sus negocios como ingenieros, ofreciendo sus servicios a agricultores, constructores y maquinistas en la región. Pronto entraron también en el negocio de la fundición de piezas de hierro y latón, y comenzaron a fabricar y reparar máquinas de vapor, calderas, maquinaria agrícola y engranajes de molinos. James Paxman poseía experiencia previa en la construcción de máquinas de vapor y la nueva empresa pronto tuvo mucho éxito en este campo. La primera máquina de vapor de la compañía (estacionaria y con caldera vertical) apareció en 1870 y fue ampliamente aclamada, siendo además la más económica de todas las probadas en el Royal Agricultural Show de ese año. El éxito inmediato de los primeros motores estacionarios con calderas verticales llevó a la empresa a ampliar su gama y empezar a ofrecer motores portátiles con calderas horizontales [18].



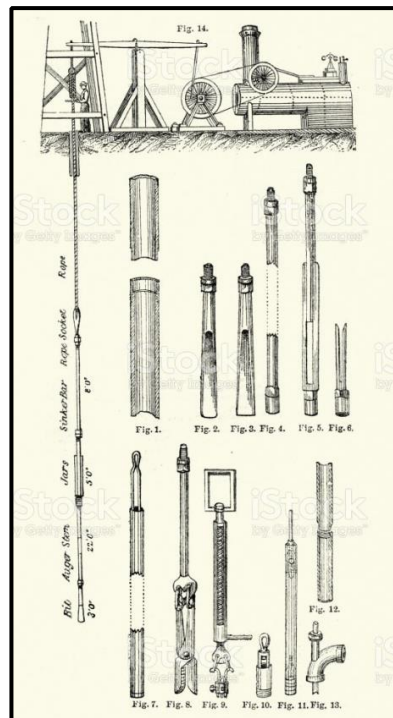
**Figura 13: Logotipo de la empresa Davey, Paxman & Co., Ltd. establecida en Colchester, Inglaterra [18].**

La máquina que nos ocupa fue encargada por la empresa *Intercolonial Boring Company* en Brisbane, Australia, el 9 de julio de 1910, en un pedido de un total de 4 máquinas portátiles (dos de ellas de 4 caballos de potencia y dos de 5). Las 4 máquinas salieron de la fábrica el 9 de diciembre de ese mismo año [18].

Con número de serie 15584, se trataba de una máquina portátil de 4 NHp, con un cilindro de 7" de diámetro y 12" de carrera. Según las especificaciones del catálogo original de *Davey, Paxman & Co.*, esta máquina operaba a una presión de 120 psi y se equipaba con una rueda de inercia de 4 pies y 6" de diámetro, capaz de girar a 140 rpm [18].

Debido a la ocupación de la empresa que realizó el encargo (*Intercolonial Boring Company*), la máquina sería utilizada para transportarla a diferentes localizaciones en las que se quisieran hacer excavaciones en busca de petróleo o agua subterránea, tal y como se ilustra en la siguiente figura.



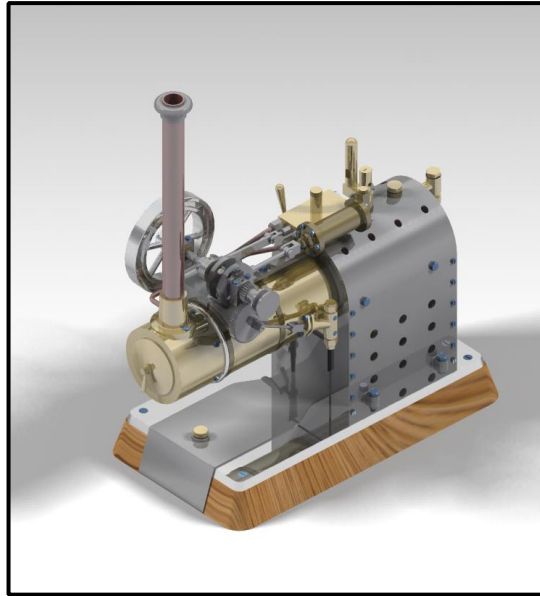


**Figura 14: Aplicación de la máquina de vapor para la excavación subterránea [19].**

Como puede observarse en las siguientes imágenes, la máquina está equipada con una cámara de combustión de grandes dimensiones, pensada para la quema de madera. Además, tanto la posición del cilindro y válvula de alimentación como las dimensiones de la rueda de inercia se corresponden con las de la réplica.



**Figura 15: Máquina No. 15584 de Davey, Paxman & Co. en su estado actual [18].**



**Figura 16: Representación de la máquina de vapor portátil modelada.**

Se puede apreciar en las figuras anteriores que existen varias diferencias entre la réplica modelada y la máquina original de Paxman. Dichas diferencias se deben a las adaptaciones propias del ámbito de aplicación de una réplica doméstica, y se detallan a continuación:

- Se sustituye el chasis con las cuatro ruedas por una base de madera y una placa metálica sobre la que se atornilla el conjunto, ya que las reducidas dimensiones de la réplica permiten que pueda ser trasladada de un sitio a otro a mano.
- El tubo de la chimenea es macizo y no permite su plegado. De nuevo, las reducidas dimensiones de la réplica permiten que el traslado de esta se realice cómodamente, sin que la chimenea pueda verse obstaculizada por elementos externos.
- En el interior de la base se añade un depósito de combustible líquido, así como un quemador con mechas. La reproducción a escala de la cámara de combustión hace que tanto el uso de combustibles sólidos como el acceso a la propia cámara para mantener el fuego sea complicado, por lo que esta adaptación para el uso de combustible líquido permite generar el vapor de agua en la caldera de manera cómoda y sencilla.
- La bomba de agua auxiliar carece de conexión con la caldera. Al tratarse de una réplica doméstica y recreativa, no está diseñada para largos ciclos de trabajo, con lo que la capacidad de la propia caldera se considera suficiente para su operación.



# 3 CATIA V5

Las siglas CATIA hacen referencia a Computer Aided Three Dimensional Interactive Application. Se trata de un software de diseño, fabricación y análisis desarrollado por Dassault Systemes. El origen de CATIA data de 1971, cuando surgió la necesidad de desarrollar el avión de combate Mirage. Desde entonces, ha tenido una amplia aceptación y aplicación por parte de numerosas empresas y fabricantes, tanto en el sector aeronáutico como en el naval, ferroviario, la automoción, construcción y energía, entre otros [22].

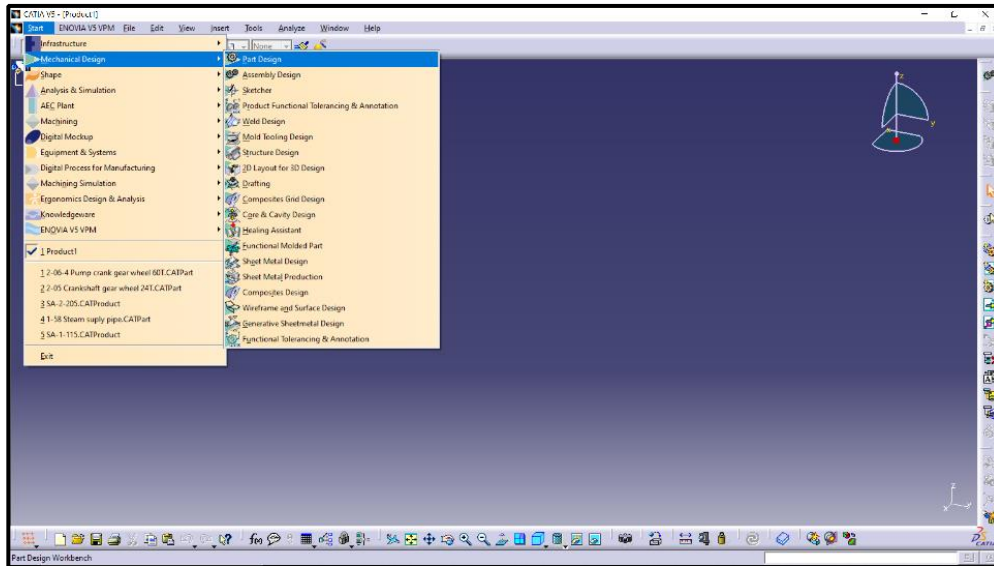


Figura 17: Entorno e interfaz de usuario CATIA V5R20.

Para el desarrollo de este proyecto se ha utilizado la versión CATIA V5 en su revisión 20 (CATIA V5R20), que fue lanzada en 2010. Es importante recalcar la versión y revisión utilizada, ya que en ocasiones la compatibilidad entre ellas no está garantizada.

## 3.1 Módulos empleados

CATIA V5 se compone de diferentes módulos, cada uno de ellos específicos para sus aplicaciones. Dentro del alcance de este proyecto se utilizarán solo algunos de ellos, que se presentan a continuación. También se describirán brevemente las herramientas y comandos más utilizados dentro de cada módulo, ya que serán nombrados de manera recurrente en capítulos posteriores.

- Mechanical Design > Part Design
- Mechanical Design > Wireframe and Surface Design
- Mechanical Design > Assembly Design
- Digital Mockup > DMU Kinematics

### 3.1.1 Mechanical Design

El módulo *Mechanical Design* se utiliza para el diseño de piezas y conjuntos y consta de varios sub-módulos, de los cuales solo se utilizarán para el desarrollo del presente trabajo los indicados a continuación.

### 3.1.1.1 Part Design

El sub-módulo *Part Design* permite diseñar modelos tridimensionales a partir de perfiles y geometrías bidimensionales generadas en sketches o bocetos contenidos en uno o varios planos [23].

Las herramientas más comúnmente utilizadas del módulo Part Design se listan a continuación, junto a una breve descripción de cada una de ellas.

- **Point:** Introduce puntos, generalmente como guía o referencia.
- **Line:** Introduce líneas, generalmente como guía o referencia.
- **Plane:** Introduce planos en los que realizar bocetos.
- **Sketch:** Permite generar un boceto 2D sobre un plano de referencia.
- **Pad:** Genera una extrusión longitudinal a partir de un boceto en 2D.
- **Shaft:** Genera una revolución de un boceto en 2D alrededor de un eje.
- **Pocket:** Realiza agujeros o vaciados sobre elementos 3D.
- **Hole:** Realiza taladros (con o sin rosca) sobre elementos 3D.
- **Rib:** Genera una extrusión a partir de un boceto en 2D, siguiendo la dirección marcada por una línea o curva directriz.
- **Slot:** Genera un vaciado o agujero sobre un elemento 3D a partir de un boceto en 2D, siguiendo la dirección marcada por una línea o curva directriz.
- **Solid Combine:** Genera un elemento 3D combinando dos bocetos planos.
- **Mirror:** Duplica un elemento simétricamente con respecto a un plano de referencia.
- **Rectangular Pattern:** Replica un elemento un número determinado de veces, separados longitudinalmente a lo largo de dos ejes perpendiculares entre sí.
- **Circular Pattern:** Replica un elemento un número determinado de veces, separados radialmente a lo largo de un arco o circunferencia completa.
- **Edge Fillet:** Convierte una unión en esquina en un canto rebordeado.
- **Chamfer:** Convierte una unión en esquina en un chaflán.

### 3.1.1.2 Wireframe and Surface Design

El sub-módulo *Wireframe and Surface Design* permite crear elementos de estructura alámbrica [24], y se utiliza para generar superficies con geometrías complejas, como por ejemplo carrocerías, carenados o superficies aerodinámicas. Las herramientas más comunes se listan a continuación.

- **Helix:** Permite generar una hélice.
- **Extrude:** Similar al Pad, permite generar superficies a partir la extrusión de un contorno.
- **Revolve:** Similar al Shaft, permite generar superficies a partir de la revolución de un contorno.
- **Fill:** Permite generar la superficie interior a un contorno cerrado.
- **Join:** Permite unir varias superficies adyacentes.
- **Close Surface:** Permite cerrar superficies previamente creadas.

### 3.1.1.3 Assembly Design

El sub-módulo *Assembly Design* permite el diseño de ensamblajes y uniones de diferentes piezas individuales para formar conjuntos, subconjuntos o mecanismos. Los diferentes componentes de un conjunto se ensamblan

mediante la aplicación de restricciones paramétricas [25].

Las herramientas más frecuentemente utilizadas del módulo Assembly Design se listan a continuación, junto a una breve descripción de cada una de ellas.

- **Existing Component:** Permite introducir una nueva pieza, previamente creada, en el conjunto.
- **Manipulation:** Permite mover uno o varios elementos en el espacio tridimensional.
- **Coincidence Constraint:** Introduce una restricción de coincidencia de ejes.
- **Contact Constraint:** Introduce una restricción de contacto entre dos superficies.
- **Offset Constraint:** Introduce una restricción de separación entre superficies, ejes o líneas.
- **Angle Constraint:** Introduce una restricción de ángulo entre superficies, ejes o líneas.
- **Fix Component:** Fija la ubicación de uno o varios elementos en el espacio tridimensional.

### 3.1.2 Digital Mockup

El módulo *Digital Mockup* permite la caracterización de un modelo tridimensional durante todo su ciclo de vida, permitiendo el diseño y configuración de productos complejos sin necesidad de construir modelos físicos.

#### 3.1.2.1 DMU Kinematics

El sub-módulo *DMU Kinematics* está dedicado a la simulación de movimientos en un ensamblaje [26]. Así, permite caracterizar cinemáticamente un conjunto formado por varias piezas interactuando entre sí, pudiendo así simular el comportamiento mecánico y dinámico de un diseño. Sus herramientas principales se describen a continuación:

- **Revolute Joint:** Permite el giro entre dos piezas.
- **Prismatic Joint:** Permite el movimiento rectilíneo entre dos piezas, actuando una de ellas como guía o carril.
- **Rigid Joint:** Permite unir dos piezas entre sí, de forma que ambas se muevan como un conjunto.
- **Cylindrical Joint:** Permite la rotación y/o traslación entre dos piezas, alrededor de un eje.
- **Simulation:** Permite simular el mecanismo de estudio dentro de los rangos definidos para los grados de libertad del mismo.
- **Compile Simulation:** Permite compilar y almacenar la simulación del mecanismo de estudio, bien para su reproducción dentro del módulo o para su exportación como archivo de vídeo.
- **Simulation Player:** Permite reproducir, dentro del módulo DMU Kinematics, una simulación previamente creada y compilada.

## 3.2 Alternativas a CATIA V5

Hoy en día, el usuario que se disponga a diseñar o modelar en 3D haciendo uso de alguna herramienta CAD/CAM dispone de un amplio abanico de softwares entre los que elegir. A lo largo de este apartado se presentarán los más relevantes a nivel industrial, siendo también por ello los que ocupan las mayores cuotas de mercado.

Es importante recalcar que cualquiera de las herramientas que se presentarán a continuación hubiera sido una elección perfectamente válida para la realización del modelado que ocupa este proyecto. La justificación de la elección de CATIA frente a estas alternativas se desarrollará en el siguiente apartado.

### 3.2.1 SolidWorks

SolidWorks es un software de diseño asistido por ordenador desarrollado por Solidworks Corp., una filial de Dassault Systemes. Nació con la intención de ofrecer una interfaz y un manejo más intuitivo y sencillo que el de CATIA, permitiendo diseñar piezas o conjuntos con gran rapidez [28], [29].



*Figura 18: Logotipo de SolidWorks [23].*

Si bien, como se ha comentado previamente, SolidWorks permite un manejo más rápido e intuitivo que CATIA, como contrapartida ofrece peores resultados a la hora de generar geometrías complejas, además de necesitar tiempos mucho mayores a la hora de realizar simulaciones [30].

Es por ello que el uso de SolidWorks no esté extendido en sectores como el aeronáutico o el automovilístico, que necesitan softwares y motores potentes para diseñar geometrías complejas [30].

### 3.2.2 Siemens NX

Siemens NX es un software de diseño por ordenador desarrollado por Siemens PLM Software [31]. Se trata de una herramienta muy potente, razón por la que, al igual que CATIA, se usa con asiduidad en industrias como la automovilística y ferroviaria, aunque tiene mucha menor presencia en el sector aeronáutico que CATIA [33].



*Figura 19: Logotipo de Siemens NX [30].*

Como principal diferencia con respecto a CATIA, se puede resaltar el hecho de que Siemens NX presenta una interfaz de usuario mucho más moderna e intuitiva [33].

### 3.2.3 PTC Creo

PTC Creo es un software de diseño y modelado asistido por ordenador, desarrollado por PTC Incp. (Parametric Technology Corporation) y lanzado al mercado en 2011 [36]. Se trata de una herramienta muy potente, que ha ido ganando aceptación, siendo utilizada hoy en día tanto por pequeñas y medianas empresas como por grandes multinacionales, como Lockheed Martin, BAE Systems o el grupo Volvo [37], [38].



*Figura 20: Logotipo de PTC Creo [31].*

### 3.3 ¿Por qué CATIA V5?

Como se ha comentado anteriormente, cualquiera de los softwares presentados en el apartado anterior hubieran sido elecciones perfectamente válidas para realizar el modelado de la máquina de vapor que ocupa a este trabajo fin de grado. Sin embargo, se ha decidido optar por utilizar CATIA V5 por las siguientes razones:

- La interfaz, módulos y utilización de CATIA V5 eran conocidos por el alumno, al ser el software utilizado en la asignatura *Diseño y fabricación asistidos por ordenador*, impartido en el Grado en Ingeniería Aeroespacial de la escuela.
- Es el software utilizado de manera estándar tanto por el fabricante aeronáutico Airbus como sus empresas matrices y subcontratadas, para el diseño y fabricación de sus piezas.



## 4 MODELADO DE PIEZAS

En este capítulo se va a describir el proceso seguido durante el modelado de cada una de las piezas componentes del modelo final. No se detallarán las normales como tornillos, tuercas, arandelas, etc. utilizadas durante el ensamblaje del conjunto, ya que se obtendrán de las librerías que ofrece CATIA V5R20 (en caso de que alguna de las normales requeridas no se encuentre en las librerías, se modificarán las paramétricas para obtener las dimensiones deseadas).

En algunos casos ha sido necesario realizar alguna modificación en las cotas de los planos originales, y serán justificadas en sus correspondientes apartados.

A la hora de nombrar cada una de las piezas, se mantendrá la denominación en inglés que aparece en los planos originales [1]. A continuación, se muestra el desglose de piezas modeladas a lo largo de este capítulo:

<i>Part Number</i>	<i>QTY</i>	<i>Part Number</i>	<i>QTY</i>
FREEDOM-1-01- WOOD BASE + BASE PLATE	1	FREEDOM-1-46- CRANK SHAFT BEARING	2
FREEDOM-1-02- FUEL TANK + BURNER	1	FREEDOM-1-50- LOWER SUPPORT PORT BLOCK	1
FREEDOM-1-03- FUEL TANK COVER	1	FREEDOM-1-51- STEAM SUPPLY VALVE SPINDLE	1
FREEDOM-1-04- FUEL TANK FILLER CAP	1	FREEDOM-1-52- VALVE CHEST	1
FREEDOM-1-05- FIRE BOX MANTEL	1	FREEDOM-1-53- OIL POT	1
FREEDOM-1-06- FIRE BOX FRONT PLATE	1	FREEDOM-1-54- CYLINDER	1
FREEDOM-1-07- FIRE BOX REAR PLATE	1	FREEDOM-1-55- CYLINDER FRONT COVER	1
FREEDOM-1-08- FIRE DOOR LEDFE	1	FREEDOM-1-56- CYLINDER REAR COVER	1
FREEDOM-1-09- FIRE DOOR	1	FREEDOM-1-57- STEAM SUPPLY ELBOW CONNECTER	1
FREEDOM-1-10- FIRE DOOR HINGE PIN	1	FREEDOM-1-58- STEAM SUPPLY PIPE	1
FREEDOM-1-11- FIRE DOOR LOCKING BRACKET	1	FREEDOM-1-59- STEAM SUPPLY PIPE NUT	3
FREEDOM-1-12- FUEL TANK SECURITY LOCK	1	FREEDOM-1-60- STEAM EXHAUST PIPE PART-1	1
FREEDOM-1-13- FUEL TANK SECURITY LOCK SCREW	1	FREEDOM-1-61- STEAM EXHAUST PIPE PART-2	1
FREEDOM-1-14- BOILER	1	FREEDOM-1-62- LARGE GEAR WHEEL AXLE SCREW	1
FREEDOM-1-15- BOILER BUSH TYPE-A M4X8X11	2	FREEDOM-2-01- CRANK SHAFT	1
FREEDOM-1-16- BOILER BUSH TYPE-B M5X10X14	3	FREEDOM-2-02- FLYWHEEL	1
FREEDOM-1-17- BOILER BUSH TYPE-C M8X12X15	1	FREEDOM-2-03- ECCENTRIC SHEAVE	1
FREEDOM-1-18- BOILER BUSH TYPE-D M8X10X15	1	FREEDOM-2-04- ECCENTRIC SLIP DISC	1
FREEDOM-1-19- BOILER BUSH TYPE-E M10X12X15	1	FREEDOM-2-05- CRANKSHAFT GEAR WHEEL 24T	1
FREEDOM-1-20- BOILER BUSH TYPE-F M10X12X15	1	FREEDOM-2-06- PUMP CRANK GEAR WHEEL 60T	1
FREEDOM-1-21- BOILER SUPPORTING BAR	2	FREEDOM-2-07- WATER PUMP RAM	1
FREEDOM-1-22- WTR. LVL. GAUGE TOP BODY	1	FREEDOM-2-08- WATER PUMP CON-ROD	1
FREEDOM-1-23- WTR. LVL. GAUGE BOTTOM BODY	1	FREEDOM-2-09- PULLEY	1
FREEDOM-1-24- WTR. LVL. GAUGE GLASS TUBE NUT	2	FREEDOM-2-10- PISTON + ROD	1
FREEDOM-1-25- WTR. LVL. GAUGE GLASS TUBE	1	FREEDOM-2-11- CON-ROD	1
FREEDOM-1-26- BOILER WATER FILLER CAP	1	FREEDOM-2-12- CYLINDRICAL SLIDE VALVE	1
FREEDOM-1-27- BOILER HEAT INSULATION BLANKET	1	FREEDOM-2-13- ECCENTRIC STRAP	1
FREEDOM-1-28- BOILER GLADDING	1	FREEDOM-M3 NUT	31
FREEDOM-1-29- SMOKE BOX END RING	1	FREEDOM-M3 WASHER	1
FREEDOM-1-30- SMOKE BOX	1	FREEDOM-M3X4 GRUB SCREW	7
FREEDOM-1-31- CHIMNEY BASE	1	FREEDOM-M3X6 GRUB SCREW	2
FREEDOM-1-32- CHIMNEY	1	FREEDOM-M3X6 PAN HEAD SCREW	33
FREEDOM-1-33- SMOKE BOX DRAIN CAP	1	FREEDOM-M3X8 PAN HEAD SCREW	8
FREEDOM-1-34- SMOKE BOX DOOR SCREW LOCK	1	FREEDOM-M3X14 PAN HEAD SCREW	2
FREEDOM-1-35- SAFETY VALVE - WHISTLE VALVE BODY	1	FREEDOM-M3X18 PAN HEAD SCREW	4
FREEDOM-1-36- SAFETY VALVE BALL VALVE	1	FREEDOM-M3X24 C-SINK SCREW	2
FREEDOM-1-37- SAFETY VALVE SPRING	1	FREEDOM-M4 NUT	1
FREEDOM-1-38- SAFETY VALVE SPRING TENSIONER	1	FREEDOM-M4 WASHER	1
FREEDOM-1-39- WHISTLE VALVE BASE	1	FREEDOM-M4X4 GRUB SCREW	2
FREEDOM-1-40- WHISTLE TUBE	1	FREEDOM-M4X10 C-SINK SCREW	4
FREEDOM-1-41- WHISTLE VALVE HANDLE	1	FREEDOM-M4X14 HEX BOLT	2
FREEDOM-1-42- DUMMY WTR. FD. PUMP HOUSING	1	FREEDOM-M5X8 HEX BOLT	1
FREEDOM-1-43- DUMMY WRT. FD. PUMP MOUNTING PLATE	1	FREEDOM-M5X12 HEX BOLT	4
FREEDOM-1-44- ENGINE BED PLATE	1	FREEDOM-M5X14 HEX BOLT	7
FREEDOM-1-45- CRANK SHAFT BEARING STAND	1	FREEDOM-M5X30 COUNTERSINK WOOD SCREW	4

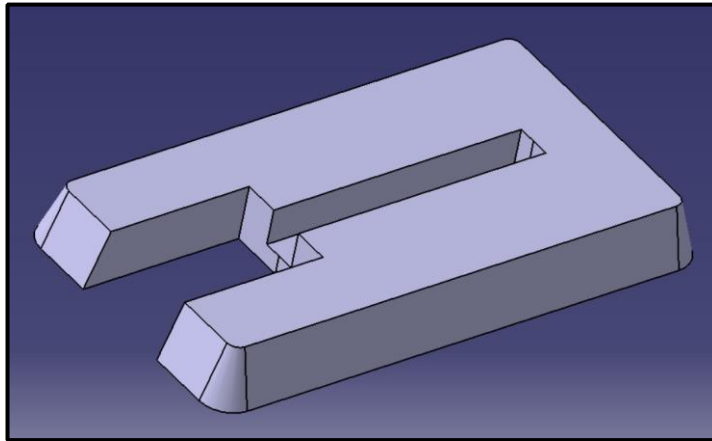
*Tabla 1: Lista de piezas del conjunto.*

## 4.1 Estructura base

La estructura base se compone de dos piezas, una primera base de madera y una placa metálica asentada y atornillada sobre ella.

### 4.1.1 Wood base

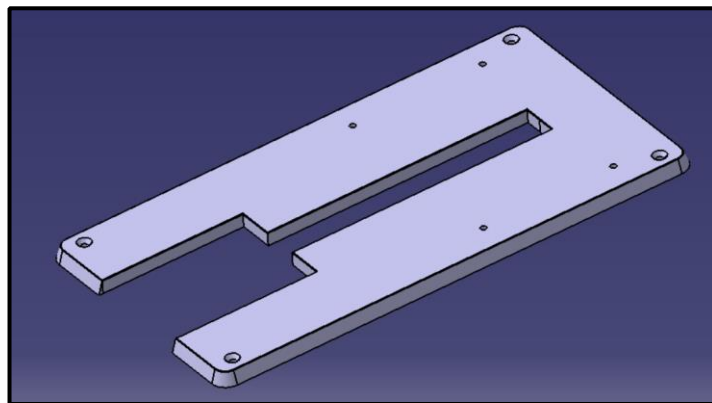
La pieza se modela a partir de la extrusión de un rectángulo. Una vez obtenida la base, se obtienen los canteados de las esquinas mediante los comandos *Edge Fillet* y *Draft*. Por último, se realizan dos vaciados con el comando *Pocket* y se aplica el material *Timber*.



*Figura 21: Base de madera.*

### 4.1.2 Base plate

La placa base, que coincide en su cara inferior con la base de madera, se modela utilizando los mismos comandos que se usaron para modelar la base.



*Figura 22: Placa base.*

Una vez generada la placa, a la que se le asigna como material aluminio, se realizan cuatro taladros avellanados de diámetro 5mm en los que se alojarán los tornillos que fijen la placa a la base de madera. También se realizan otros cuatro taladros roscados de M5 en los que se alojarán los tornillos que fijen la estructura de la cámara de combustión a la base.

## 4.2 Depósito de combustible y quemador

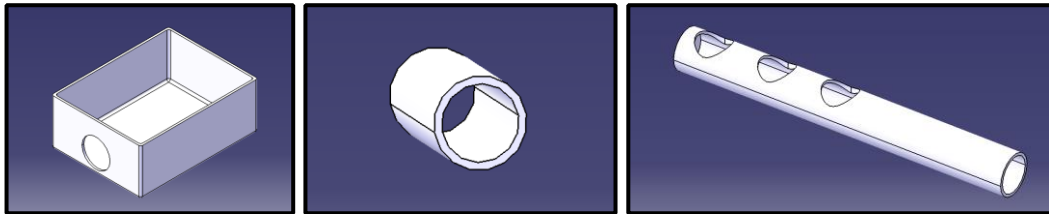
A continuación, se detallará el modelado del tanque de combustible y el quemador, así como la tapa del tanque



y el tapón a través del cual se accede al depósito para reabastecerlo de combustible.

#### 4.2.1 Fuel tank and burner

De nuevo se parte de la extrusión de un rectángulo con un *Pad* para obtener la base del depósito. Posteriormente se le hace un vaciado con el comando *Shell*, se redondean las aristas con *Edge Fillet* y se realiza un agujero para comunicar el depósito con el tubo de alimentación de los quemadores mediante la herramienta *Pocket*.



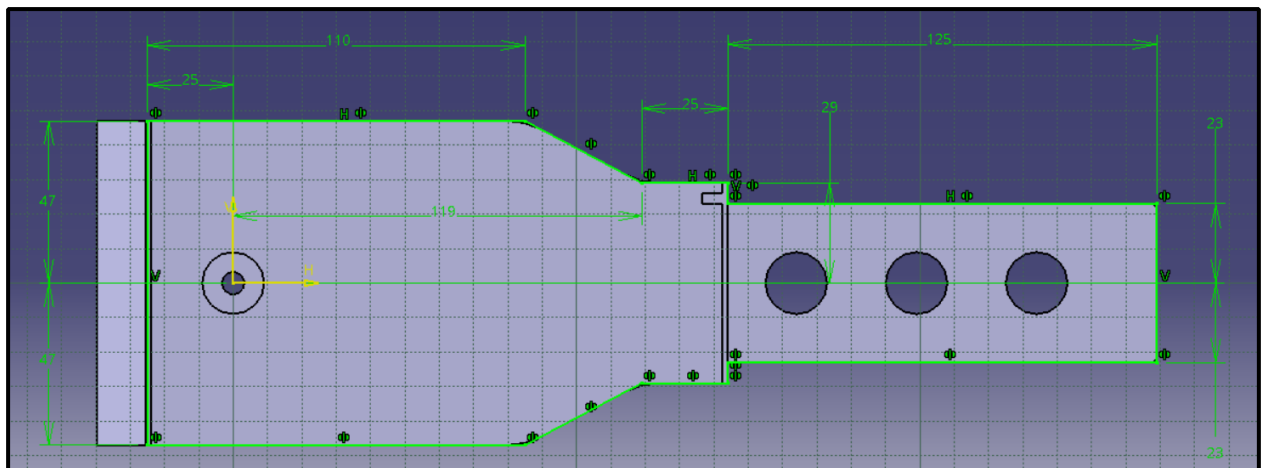
**Figura 23: Depósito de combustible y quemadores.**

A continuación, se extruye el tubo de alimentación, que se vacía posteriormente mediante un *Pocket*. También se utiliza el comando *Pocket* para realizar los tres agujeros en los que se alojarán los quemadores.

Los quemadores se generan mediante un *Pad* hueco con origen en la cara superior de los conductos, y se selecciona la opción *Up to surface* para delimitar el final de la extrusión en la superficie exterior del contorno de unión. Tanto el depósito como los conductos de los quemadores están hechos en latón (*Brass*).

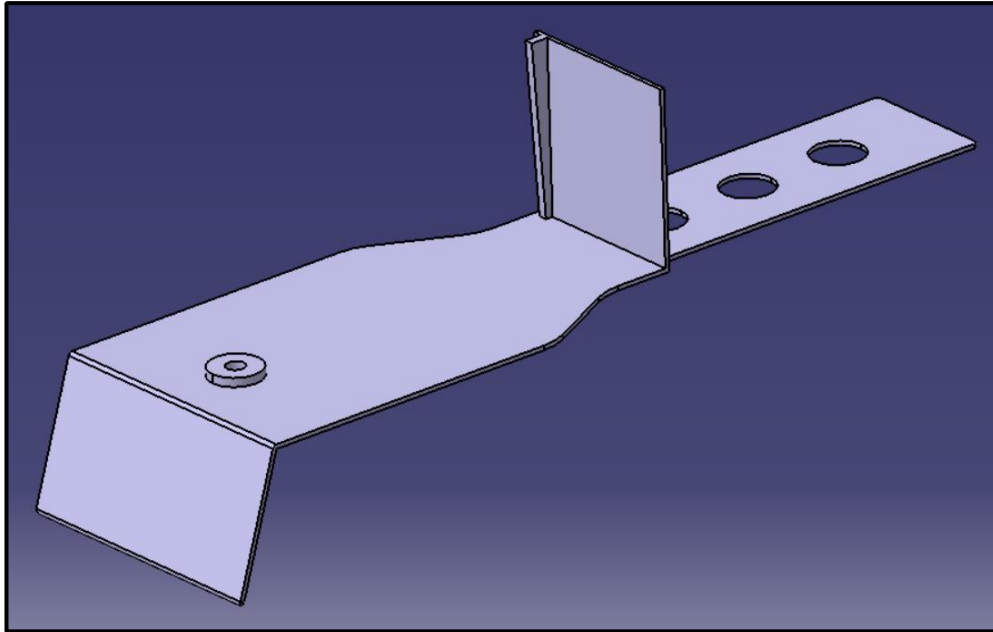
#### 4.2.2 Fuel tank cover

La cubierta está formada por una chapa plana desarrollada en varios tramos y conformada en latón (*Brass*). Se comienza su modelado extruyendo el perfil de la parte plana que irá apoyada sobre la cara superior de la placa de aluminio.



**Figura 24: Boceto de la parte plana de la cubierta.**

A continuación, se realizan los agujeros pasantes para los quemadores mediante el comando *Pocket* y se extruyen tanto la chapa vertical como el cilindro sobre el que apoyará el tapón, al que se le hace también un agujero roscado mediante *Hole*. Por último, se extruye la chapa angular con el mismo grosor que la horizontal.

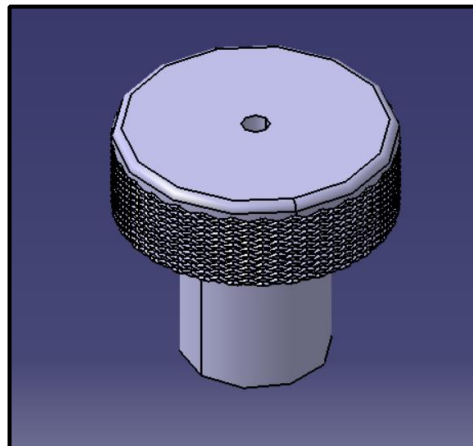


*Figura 25: Cubierta del depósito de combustible.*

### 4.2.3 Fuel tank filler cap

El tapón de relleno está hecho en latón, y se genera extrusionando dos perfiles circulares y aplicándole al correspondiente al vástago una rosca mediante el comando *Thread*. El acabado moleteado de la cabeza se genera definiendo una hélice sobre la superficie exterior de la cabeza; esta hélice servirá como guía en el comando *Slot* para hacer una muesca en forma triangular. Una vez obtenida la muesca, se realiza un *Circular Pattern* para replicarla 30 veces a lo largo de la corona completa.

Por último, se realiza un agujero pasante que atraviesa todo el tapón y que comunica el depósito de combustible con el exterior.



*Figura 26: Tapón de relleno del depósito de combustible.*

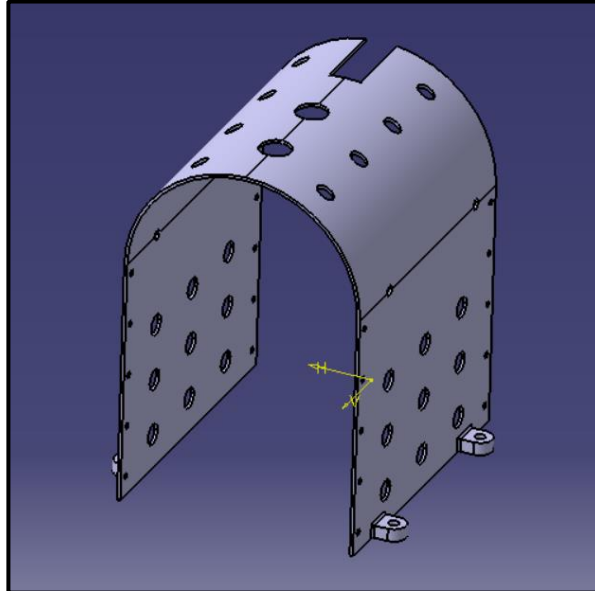
## 4.3 Cámara de combustión

La cámara de combustión es la encargada de mantener las altas temperaturas que generan el vapor en la caldera. Está compuesta de numerosas partes que se detallan a continuación.

### 4.3.1 Fire box mantel

Para generar la cubierta de la cámara de combustión, se realiza un *Pad* para extrusionar la sección en forma de

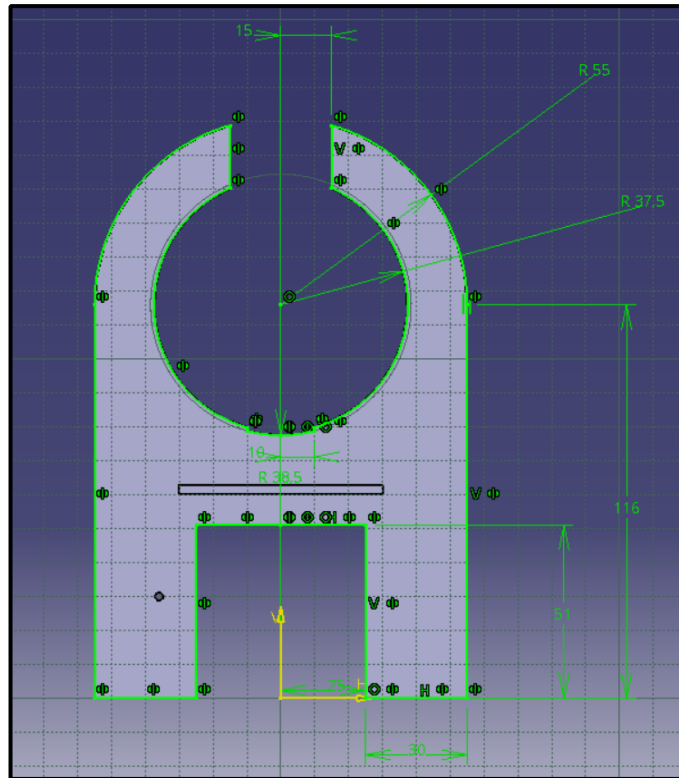
U invertida. A continuación, se realiza otro *Pad* con el que se generan las aletas que servirán para unir la cubierta a la base del conjunto. Por último, se utiliza la herramienta *Pocket* para realizar tanto los agujeros de unión de las tapas como los agujeros de ventilación (en ambos casos, al estar distribuidos simétricamente, se utiliza el comando *Rectangular Pattern*), además del vaciado rectangular en la parte superior que servirá para alojar la base de la válvula de alimentación. Se le aplica como material acero, al igual que al resto de partes componentes de la cámara de combustión.



*Figura 27: Cubierta de la cámara de combustión.*

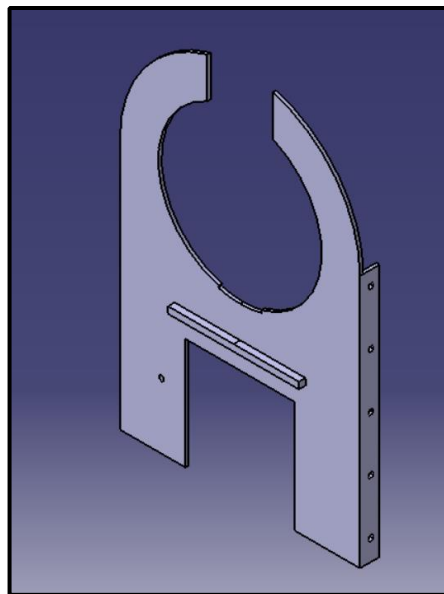
#### 4.3.2 Fire box front plate

La tapa o placa frontal de la cámara de combustión se genera de manera sencilla a realizando un *Pad* del siguiente boceto:



**Figura 28:** Boceto de la placa frontal de la cámara de combustión.

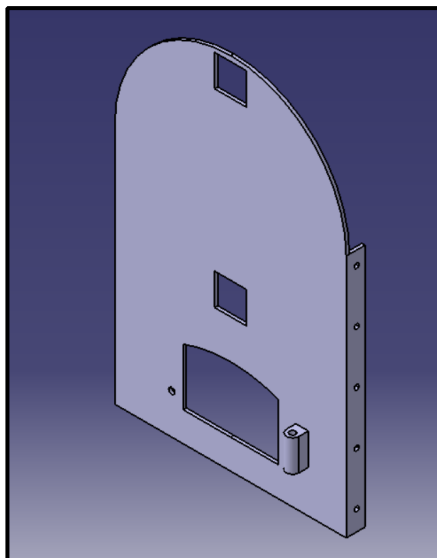
A continuación, se realiza otro *Pad* sobre una de las caras laterales para generar una de las aletas de unión a la cubierta, que será duplicada mediante el comando *Mirror*. Sobre estas aletas, se realizan los taladros pasantes roscados mediante *Hole* y *Rectangular Pattern*. Por último, se realiza el saliente de la cara exterior mediante un *Pad* rectangular.



**Figura 29:** Placa frontal de la cámara de combustión.

### 4.3.3 Fire box rear plate

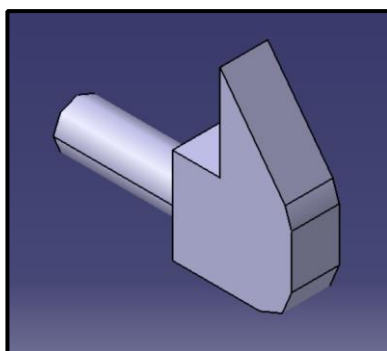
La tapa o placa trasera de la cámara de combustión se modela de forma parecida a la frontal, usándose para ello los comandos *Pad*, *Hole*, *Rectangular Pattern*. Como salvedad, en este caso se utiliza el comando *Pocket* para generar los vaciados de la placa, así como el agujero pesante del soporte de la bisagra.



*Figura 30: Placa trasera de la cámara de combustión.*

#### 4.3.4 Fire door ledge

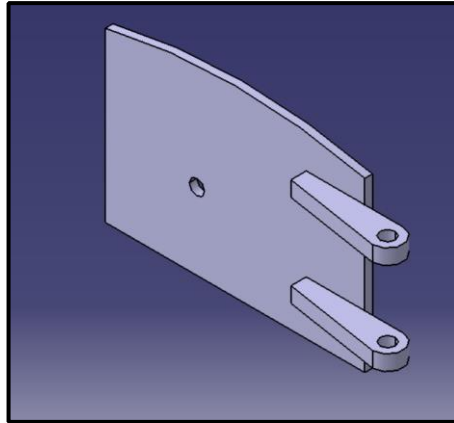
A continuación, se modelará el soporte sobre el que descansará el pestillo de la compuerta que permite el acceso a la cámara de combustible desde la tapa trasera. La pieza se genera de manera sencilla extrusionando la geometría del cuerpo. Obtenido el cuerpo, se suavizan las curvas con *Edge Fillet* y mediante otro pad, se genera el vástago, que finalmente será roscado utilizando el comando *Thread*.



*Figura 31: Soporte del pestillo.*

#### 4.3.5 Fire door

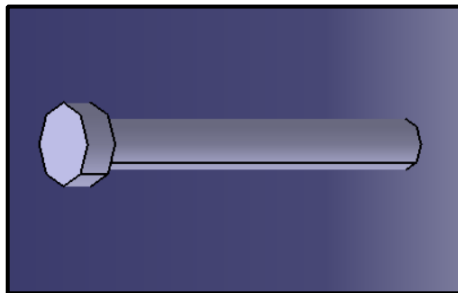
La compuerta abatible de la tapa trasera se genera de manera sencilla. En primer lugar se genera un *Pad* con el contorno de la puerta, sobre el que se hará un *Pocket* circular para el alojamiento del pestillo. Una vez generado el primer *Pad*, se realiza, en un plano perpendicular el boceto de los brazos que conectarán con la bisagra.



*Figura 32: Compuerta abatible de la cámara de combustión.*

#### 4.3.6 Fire door hinge pin

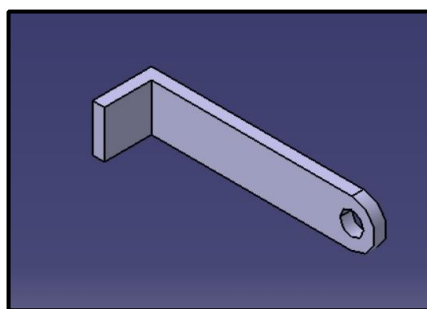
El pasador de la bisagra se obtiene sin más que generar dos *Pads* cilíndricos consecutivos.



*Figura 33: Pasador de la bisagra.*

#### 4.3.7 Fire door locking bracket

De nuevo, el pestillo de bloqueo de la compuerta abatible de la cámara de combustión se modela de forma sencilla, sin más que hacer dos *Pads*.



*Figura 34: Pestillo de bloqueo de la compuerta.*

### 4.4 Bloqueo del depósito de combustible

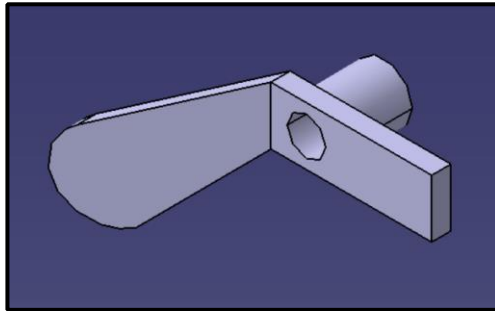
Tanto el pestillo giratorio como el tornillo de bloqueo se encargan de fijar la tapa del depósito de combustible contra la cámara de combustión, evitando así posibles derrames.

#### 4.4.1 Fuel tank security lock

El cierre de seguridad de la tapa del depósito de combustible no es más que un pestillo giratorio, encargado de

sostener la tapa del depósito contra la placa delantera de la cámara de combustión.

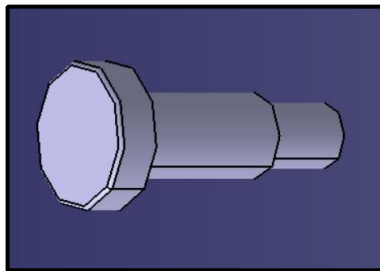
Para modelar el pestillo, se parte de un *Pad* de sección rectancular para generar la superficie de bloqueo. Sobre esta superficie, se genera otro *Pad* cilíndrico y se realiza un *Pocket* pasante a ambos cuerpos para hacer el alojamiento del tornillo de fijación. A continuación, se genera un plano girado 20° con respecto a la superficie de bloqueo, en el que se realiza un boceto base con forma rectangular para generar el mango del pestillo. Por último, se realiza en este mismo plano un *Pocket* para conseguir la geometría final del mango.



*Figura 35: Pestillo de bloqueo del depósito de combustible.*

#### 4.4.2 Fuel tank security lock screw

De nuevo, el tornillo de bloqueo del pestillo se genera de manera sencilla mediante varios *Pads* cilíndricos. Además, se suaviza la arista de la cabeza del tornillo con *Edge Fillet* y se da rosca al último tramo del tornillo con *Thread*.



*Figura 36: Tornillo de bloqueo del pestillo.*

## 4.5 Caldera

La caldera es la encargada de almacenar el agua y generar el vapor al ser sometida a las altas temperaturas generadas en la cámara de combustión. Por lo tanto, debe ser un depósito estanco y correctamente aislado del exterior para mantener eficiencias aceptables. Además, presenta numerosos conductos que permiten la salida del vapor, la indicación de nivel de agua y el reabastecimiento.

### 4.5.1 Boiler

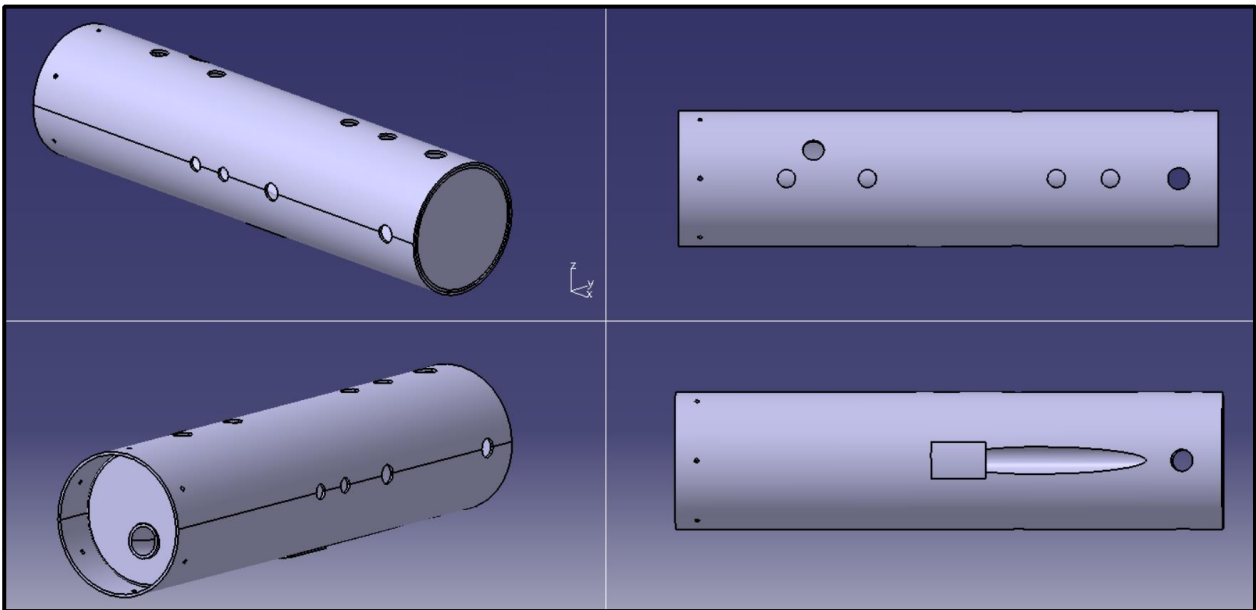
La caldera un depósito cilíndrico en el que se almacena el agua. Cuenta con un conducto hueco que lo atraviesa desde su parte inferior hasta una de sus tapas, encargado de expulsar los gases de la combustión, amén de varias aperturas cuyas funciones se detallarán durante el ensamblado.

El modelado de la caldera se realiza en su totalidad con los comandos *Pad*, *Pocket*, *Hole*, *Edge Fillet* y *Circular Pattern*. La parte más compleja de modelar es el conducto hueco que permite la salida de los gases de combustión desde la cámara hasta la caja de humos. Para realizarlo, se realiza primero un *Slot* cilíndrico para realizar el vaciado, para a continuación generar el conducto con el espesor definido en el plano mediante el comando *Rib*.

Al ser una pieza que estará en todo momento en contacto con agua, y por tanto será susceptible de sufrir

corrosión, se le aplica como material cobre.

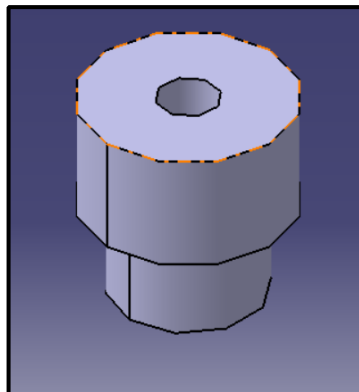
En la siguiente figura se ilustran varias vistas con las que se pretende mostrar todos los detalles del modelo.



*Figura 37: Caldera.*

#### 4.5.2 Boiler bush Type-A M4x8x11

Este primer casquillo, encajado en dos posiciones sobre el lateral de la caldera en su posición final, se encarga de ofrecer una superficie de apoyo plana para el montaje del cuerpo de la bomba de agua, a través de su correspondiente placa de montaje.

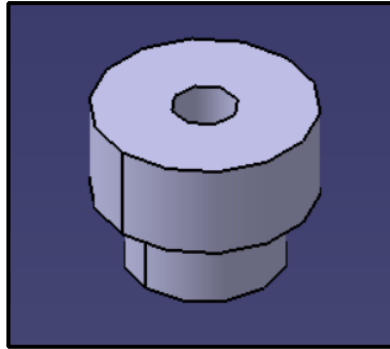


*Figura 38: Casquillo tipo A.*

#### 4.5.3 Boiler bush Type-B M5x10x14

Este casquillo sirve para ofrecer una base sobre la que roscar los pernos de anclaje del soporte del motor, y se genera fácilmente con los comandos *Pad*, *Pocket* y *Hole*. El material utilizado es bronce.

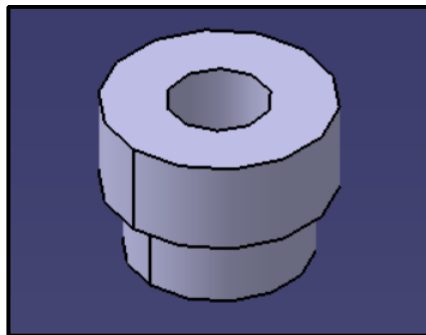




*Figura 39: Casquillo tipo B.*

#### 4.5.4 Boiler bush Type-C M8x12x15

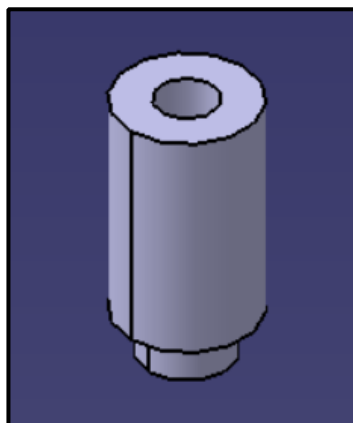
Este casquillo, hecho en bronce, se encarga de conectar la caldera con la línea de suministro de vapor de agua “limpio” hacia la válvula de alimentación. Se genera de manera sencilla con los comandos *Pad*, *Pocket* y *Hole*.



*Figura 40: Casquillo tipo C.*

#### 4.5.5 Boiler bush Type-D M8x10x15

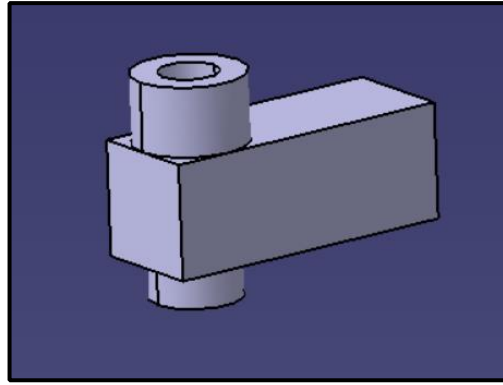
Este casquillo se encarga de suministrar a la válvula de seguridad y a la válvula de silbato con vapor de agua procedente de la caldera. Se genera de manera sencilla con los comandos *Pad*, *Pocket* y *Hole*. El material utilizado es bronce.



*Figura 41: Casquillo tipo D.*

#### 4.5.6 Boiler bush Type-E M10x12x15

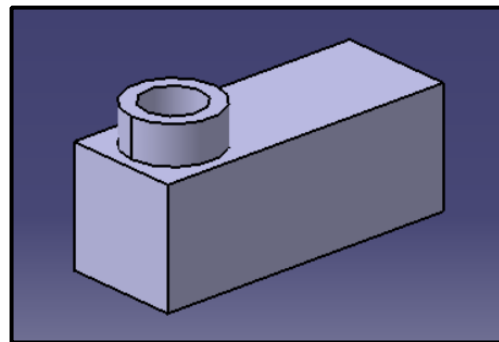
Este casquillo, ubicado en la parte superior de la caldera, sirve de conexión para el indicador de nivel de agua. El modelo se realiza de manera sencilla con los comandos *Pad*, *Pocket* y *Hole*. El material utilizado es bronce.



*Figura 42: Casquillo tipo E.*

#### 4.5.7 Boiler bush Type-F M10-15-15

Al igual que el anterior, este casquillo, ubicado en la parte inferior de la caldera, sirve de conexión para el indicador de nivel de agua. El modelo se realiza de manera sencilla con los comandos *Pad*, *Pocket* y *Hole*. El material utilizado es bronce.

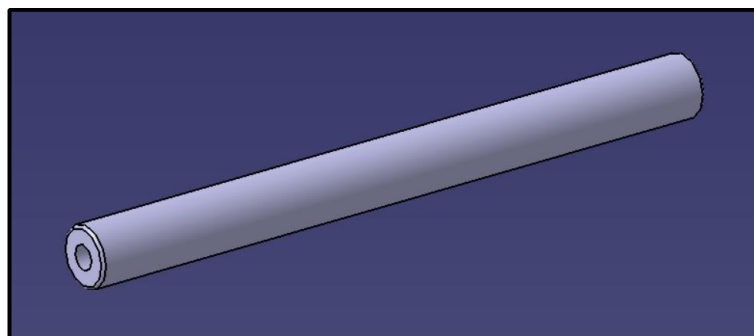


*Figura 43: Casquillo tipo F.*

#### 4.5.8 Boiler supporting bar

Esta barra, fabricada en bronce, se encarga de atravesar horizontalmente la caldera en dos posiciones. Correctamente alineada contra los orificios de la cubierta de la cámara de combustión, permite sostener el peso de la caldera.

Para su modelado se emplean los comandos *Pad*, *Pocket*, *Hole* y *Edge Fillet*.

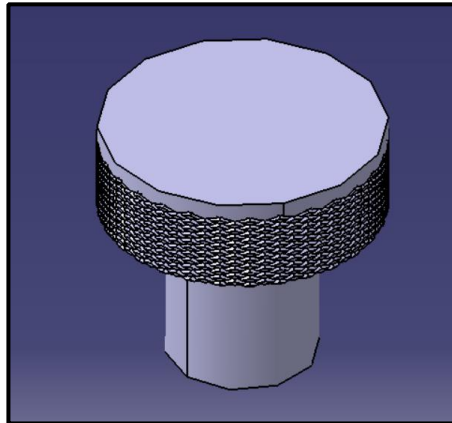


*Figura 44: Barra portante de la caldera.*

#### 4.5.9 Boiler water filler cap

Este tapón roscado permite rellenar la caldera con agua a medida que el nivel disminuye. Tanto la generación del moleteado como la propia geometría de la pieza son análogas a las descritas en 4.2.3. Se le asigna como material latón (*Brass*), al tratarse de una pieza susceptible de sufrir corrosión.

Para asegurar la estanqueidad de la caldera cuando el tapón se encuentre instalado, se modela también una junta de presión (*Seal*), que se genera de manera sencilla mediante un simple *Pad*, y a la que se le asigna como material goma (*Rubber*).

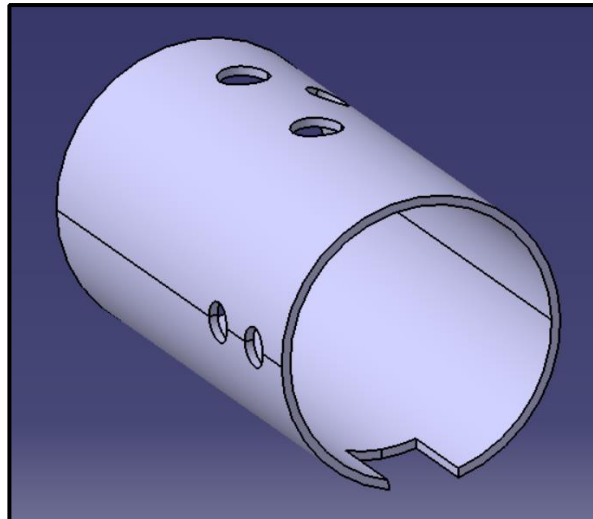


*Figura 45: Tapón de relleno de la caldera.*

#### 4.5.10 Boiler heat insulation blanket

El aislante de la caldera se encarga de evitar el intercambio de temperatura entre la caldera y el entorno. Se genera con los mismos comandos que la propia caldera, al tratarse de una camisa que encaja alrededor de la superficie exterior de la caldera, mimetizando sus aperturas.

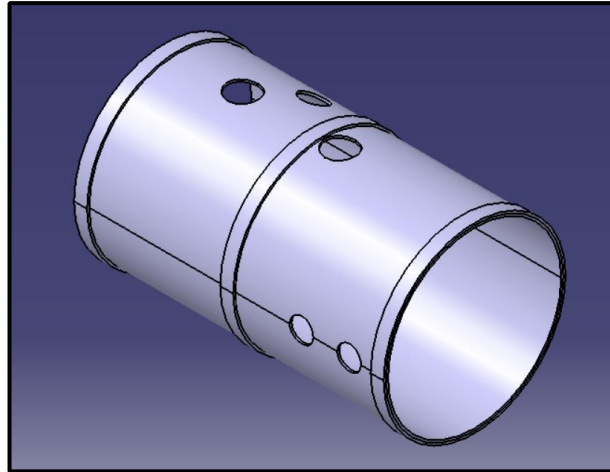
Como material con buenas propiedades de aislamiento térmico, se elige *Epoxy* de la librería de materiales de CATIA.



*Figura 46: Aislamiento térmico de la caldera.*

#### 4.5.11 Boiler cladding

El revestimiento de la caldera, formado por una camisa metálica de latón y tres anillos de bronce, se modela de manera análoga a 4.5.1.



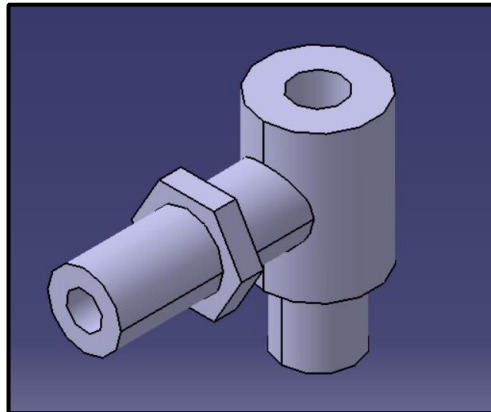
*Figura 47: Revestimiento de la caldera.*

## 4.6 Indicador de nivel de agua

El indicador de nivel se alimenta directamente de la caldera, y mediante un tubo de cristal externo (que sobresale a la cámara de combustión), ofrece una referencia visual clara de la cantidad de agua presente en el sistema.

### 4.6.1 Water level gauge top body

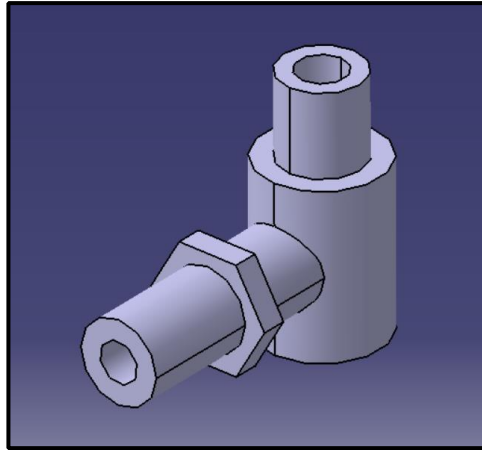
El cuerpo superior del indicador no es más que un conector a 90°. Está hecho en latón y su geometría se genera de manera sencilla con los comandos *Pad*, *Hole*, *Pocket*, *Thread* y *Edge Fillet*. Para asegurar la estanqueidad, es necesario colocar juntas de goma en sus tres conexiones. En su conexión superior se conecta un tapón roscado, que no se detalla por ser su modelado trivial.



*Figura 48: Cuerpo superior del indicador de nivel de la caldera.*

### 4.6.2 Water level gauge bottom body

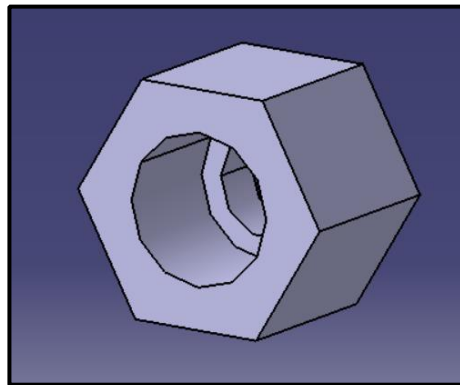
El cuerpo inferior cumple la misma función que el superior y se modela de forma análoga.



*Figura 49: Cuerpo inferior del indicador de nivel de la caldera.*

#### 4.6.3 Water level gauge glass tube nut

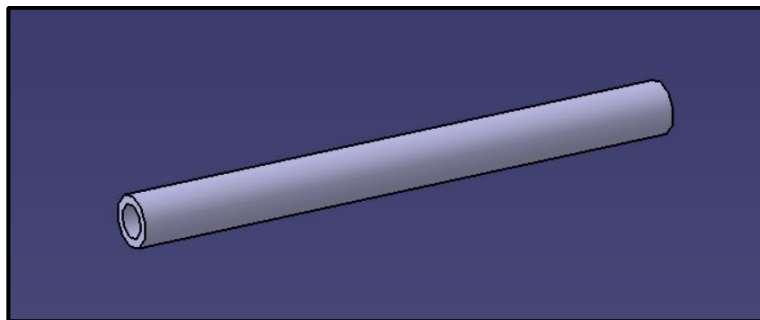
Esta tuerca se encarga de asegurar la conexión del tubo de cristal del indicador contra los cuerpos superior e inferior. Al igual que el resto de las piezas metálicas del indicador, está hecha de latón, y lleva una junta de goma alojada en su interior para evitar fugas de agua. Se modela mediante los comandos *Pad*, *Pocket* y *Hole*.



*Figura 50: Tuerca del tubo del indicador.*

#### 4.6.4 Water level gauge glass tube

El tubo de cristal del indicador, colocado en posición vertical y conectado a los cuerpos superior e inferior, permite visualizar el nivel de agua dentro de la caldera. Se modela de manera muy sencilla, sin más que realizar un *Pad* de un boceto con dos circunferencias concéntricas. Se toma de la librería de materiales de CATIA el material *Glass*.



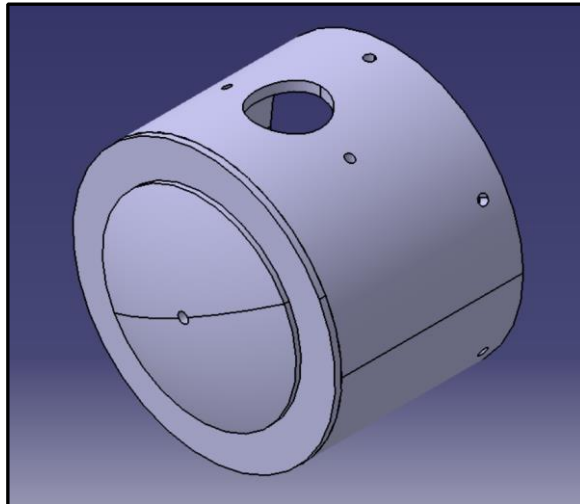
*Figura 51: Tubo de cristal del indicador de nivel.*

## 4.7 Colector de escape

El colector de escape (o caja de humos) se encarga de acumular los gases resultantes de la combustión, una vez éstos han atravesado la caldera. Desde el colector, los gases son dirigidos hacia la chimenea, por la que escapan al exterior.

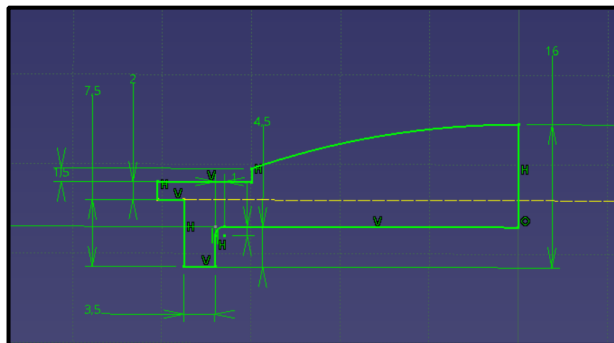
### 4.7.1 Smoke box

El cuerpo principal del colector se genera mediante un *Pad* de sección cilíndrica hueca, al que posteriormente se le realizan los *Pocket* correspondiente al conducto de la chimenea y casquillo de drenaje, así como los *Hole* roscados a los que se atornillará la base de la chimenea.



**Figura 52: Colector de escape.**

Para generar la tapa de la caja, se hace uso del módulo *Wireframe and Surface Design*, y se aplica el comando *Revolut* al boceto de la sección transversal. Una vez obtenida la superficie, se utiliza el comando *Close Surface* dentro de *Part Design* para obtener la tapa. A continuación, se muestra el detalle del boceto a partir del cual se obtiene la tapa.



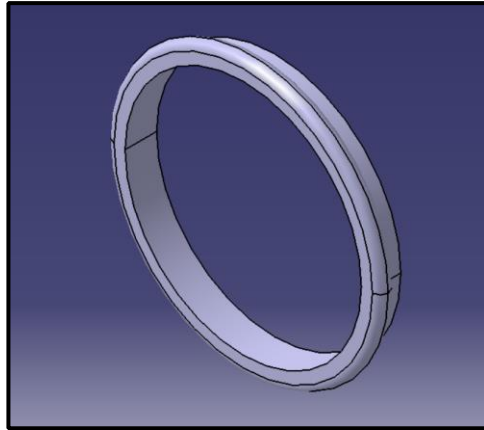
**Figura 53: Boceto de la tapa del colector de escape.**

Tanto el cuerpo del colector, la tapa y el casquillo están modelados en latón (*Brass*)

### 4.7.2 Smoke box end ring

Este anillo sirve de interfaz para el ajuste entre el colector de escape y la caldera. Al estar únicamente en contacto con el revestimiento de la caldera y la cara interna del colector, no es susceptible de sufrir corrosión, por lo que se modela en aluminio.

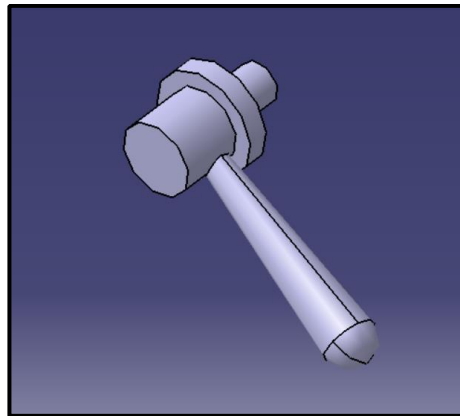
El proceso seguido para el modelado es sencillo: se genera la base del anillo mediante dos *Pads* cilíndricos. A continuación, se utiliza *Edge Fillet* para redondear la cara externa del cilindro de mayor diámetro, y por último se realiza un *Pocket* que atraviesa los dos cilindros, convirtiéndolos en anillos.



*Figura 54: Anillo de unión del colector de escape.*

#### 4.7.3 Smoke box door screw lock

Este cierre manual va roscado a la tapa del colector de escape, y está fabricado en latón. El modelado del cuerpo resulta sencillo, lográndose con los comandos *Pad* y *Thread*.



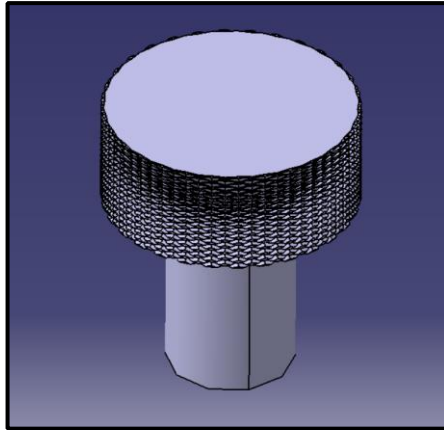
*Figura 55: Cierre roscado del colector de escape.*

En este caso, es el modelado del mango el que conlleva una mayor complejidad. Para empezar, se realiza un boceto con el eje del mango, que proyectado sobre un plano perpendicular a él sobre la superficie del cuerpo nos dará el centro del cilindro que queremos extrusionar. Para obtener el cilindro realizaremos un *Pad* al cual le definiremos sus dos límites: el primero de ellos será *Up to Surface* (la del cuerpo del cierre), mientras que el segundo será la cota correspondiente. Tras obtener el cilindro recto, se realiza un *Draft* para dar la apertura al contorno exterior. Por último, para generar la semiesfera se hace de nuevo uso del módulo *Wireframe and Surface Design* y el comando *Revolute*.

#### 4.7.4 Smoke box drain cap

Este tapón roscado permite drenar el colector de escape. Tanto la generación del moleteado como la propia geometría de la pieza es análoga a la descrita en 4.2.3. Se le asigna como material latón (*Brass*), al tratarse de una pieza susceptible de sufrir corrosión.

Para asegurar la estanqueidad cuando el tapón se encuentre instalado, se modela también una junta de presión (*Seal*), que se genera de manera sencilla mediante un simple *Pad*, y a la que se le asigna como material goma (*Rubber*).



*Figura 56: Tapón de drenaje del colector de escape.*

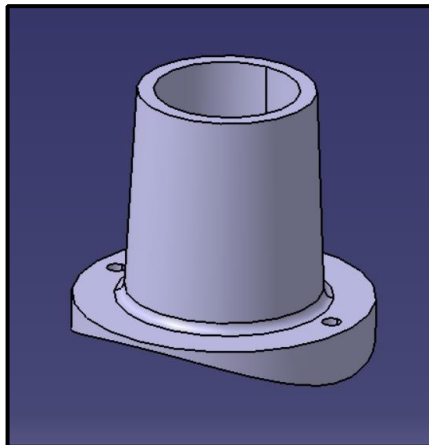
## 4.8 Chimenea

La chimenea es el conducto encargado de dirigir los gases resultantes de la combustión hacia el exterior.

### 4.8.1 Chimney base

La base de la chimenea se encarga de ofrecer asiento sobre la superficie del colector de escape, y está hecha en latón. Para su modelado, se utilizan los comandos *Revolut* y *Close Surface* para generar los cuerpos cilíndricos. Una vez obtenidos, se realiza un *Pocket* de una sección circular en la parte inferior de la base para generar la superficie de ajuste sobre el colector.

Por último, se realiza un *Edge Fillet* para suavizar la arista de unión entre los dos cilindros y se generan varios *Pockets*: alojamiento el tubo de la chimenea, conexión con el colector, entrada de vapor de agua desechado y orificios para los tornillos de unión al colector.

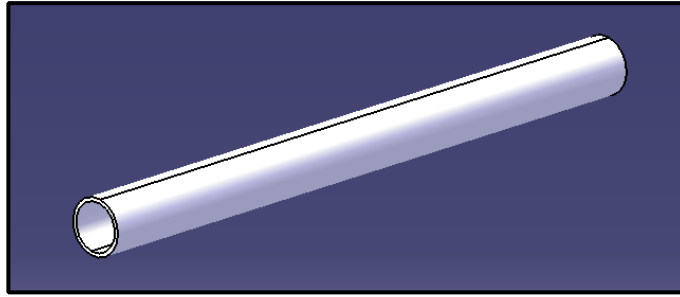


*Figura 57: Base de la chimenea.*

### 4.8.2 Chimney

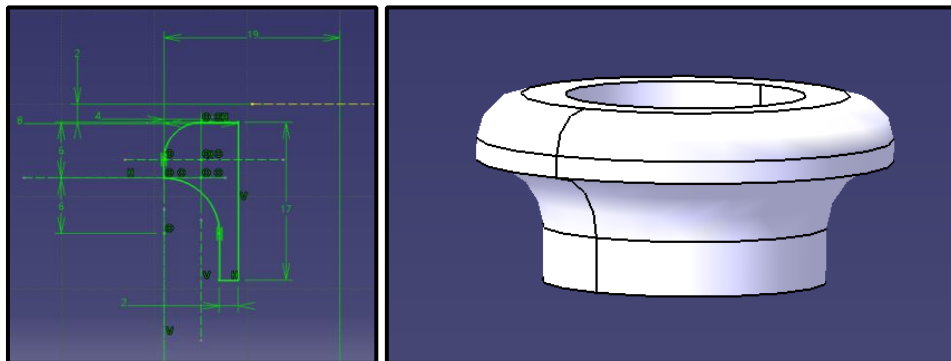
La chimenea está formada por el tubo o conducto de cobre y el sombrero, hecho en acero. El diseño del tubo es trivial, obtenido simplemente a partir de un *Pad* circular y un posterior *Pocket* para realizar el vaciado.





**Figura 58: Conducto de la chimenea y sombrerete.**

Por su parte, el modelado del sombrerete requiere los comandos *Revolut* y *Close Surface*, generándose el cuerpo a partir del boceto mostrado a continuación:



**Figura 59: Boceto para la obtención del sombrerete y pieza extruida.**

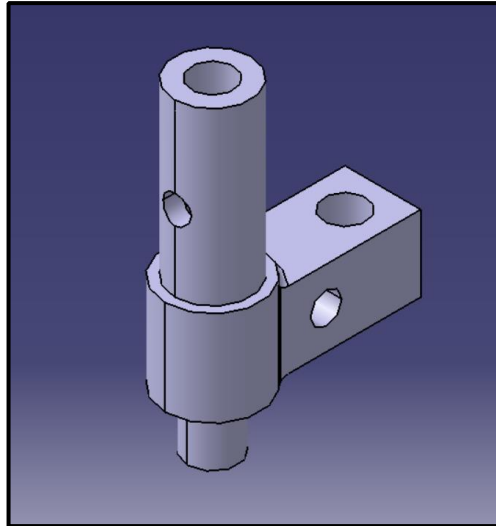
## 4.9 Válvula de seguridad

La válvula de seguridad se encuentra directamente conectada a la caldera, y se encarga de liberar vapor de agua al exterior en caso de que este alcance una presión excesiva. El valor de presión al que se libere vapor vendrá determinado por la constante elástica del muelle utilizado.

### 4.9.1 Safety valve – whistle base body

El cuerpo de la válvula es compartido tanto para la válvula de seguridad como para la de silbato. Se conecta, mediante su casquillo correspondiente, a la caldera, y contiene los conductos necesarios para permitir el flujo de vapor desde ella hasta los mecanismos de la válvula de seguridad y de la válvula de silbato.

El modelado es sencillo, y se obtiene mediante los comandos *Pad*, *Pocket*, *Hole*, *Thread* y *Edge Fillet*. El material utilizado es latón.

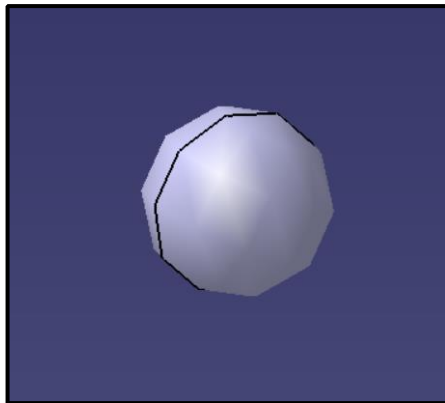


*Figura 60: Cuerpo de la válvula de seguridad y de la válvula de silbato.*

#### 4.9.2 Safety valve ball valve

Esta esfera de acero se encarga de bloquear el conducto de salida de la válvula de seguridad. Se encuentra en esta posición de bloqueo gracias a la acción de un muelle, y en caso de que la presión aumente, la bola vence la tensión del muelle, dejando al descubierto el conducto de salida.

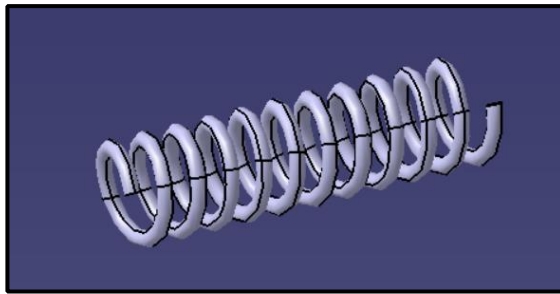
El modelado de la bola es bastante sencillo, no hay más que aplicar el comando *Revolute* a una semicircunferencia y a continuación ejecutar el comando *Close Surface*.



*Figura 61: Bola de acero de la válvula de seguridad.*

#### 4.9.3 Safety valve spring

Este muelle de acero es el encargado de mantener la bola anterior en su posición de bloqueo. Para su modelado, se utiliza en primer lugar el comando *Helix*, dentro del módulo *Wireframe and Surface Design*. Con él generamos una hélice con los valores determinados en el plano. A continuación, dentro del módulo *Part Design*, utilizamos el comando *Rib* para barrer una sección circular a lo largo de la hélice previamente generada.

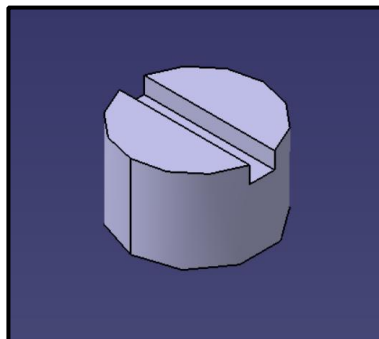


*Figura 62: Muelle de la válvula de seguridad.*

#### 4.9.4 Safety valve spring tensioner

Este tapón de latón, roscado sobre la parte superior del cuerpo de la válvula de seguridad, actúa como tensor del muelle.

Su modelado se obtiene de manera sencilla mediante los comandos *Pad*, *Pocket* y *Thread*.



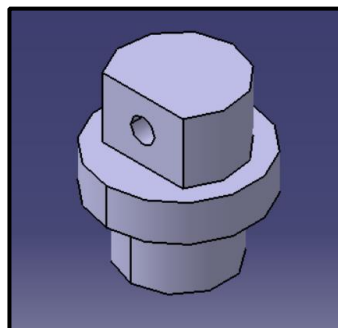
*Figura 63: Tensor del muelle de la válvula de seguridad.*

#### 4.10 Válvula de silbato

La válvula de silbato permite emitir un sonido de aviso cuando se opera su manivela. Al abrir la manivela, se permite el paso de vapor hacia la campana del silbato, donde resuena y emite un sonido característico.

##### 4.10.1 Whistle valve base

La base de la válvula de silbato está modelada en latón, y se obtiene de manera sencilla con los comandos *Pad*, *Pocket* y *Thread*.



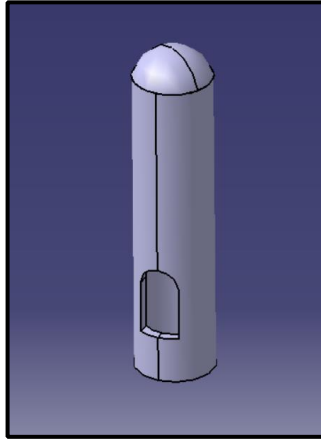
*Figura 64: Base de la válvula de silbato.*

##### 4.10.2 Whistle tube

El tubo o campana de la válvula se encarga de hacer resonar el vapor en su interior, de manera que se emita un

sonido característico que suele utilizarse como señal de aviso o atención.

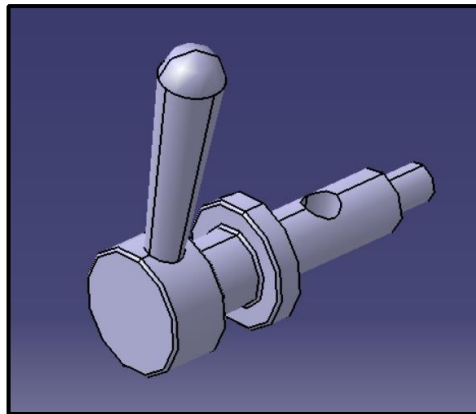
El tubo se realiza con los comandos *Pad* y *Pocket*, mientras que el capuchón superior se realiza mediante *Revolute* y *Close Surface*. El material utilizado es latón, por ser una pieza en contacto con vapor de agua.



*Figura 65: Campana de la válvula de silbato.*

### 4.10.3 Whistle valve handle

Esta manivela permite la apertura y cierre manual de la válvula de silbato. Está fabricada en acero, y para modelarla se ha seguido un proceso similar al utilizado en 4.7.3.



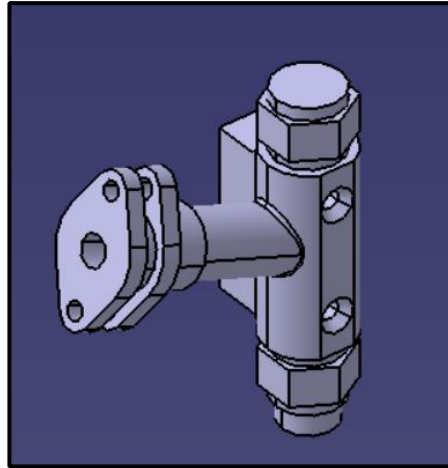
*Figura 66: Manivela de la válvula de silbato.*

## 4.11 Bomba de agua (dummy)

Aunque carece de utilidad en el modelo (de ahí que se trate de piezas dummies), se ejemplifica el montaje de una bomba de agua accionada, a través de engranajes y bielas, por el mismo movimiento recíproco del pistón. La bomba en sí no es funcional y únicamente tiene un propósito ilustrativo; por ello, se llega a modelar con un tramo representativo de tubería, pero no está conectada a ningún depósito o reservorio del que se pueda extraer agua.

### 4.11.1 Dummy water feed pump housing

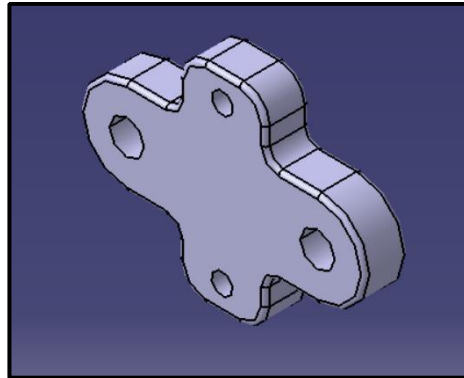
El cuerpo de la bomba, fabricado en latón, se genera mediante los comandos *Pad*, *Pocket*, *Hole* y *Edge Fillet*, y se encarga de alojar el pistón o ariete que provocaría el movimiento del agua y de comunicar con la tubería de la que provendría el agua.



*Figura 67: Cuerpo de la bomba de agua.*

#### 4.11.2 Dummy water feed pump mounting plate

Esta placa plana de montaje ofrece una interfaz adecuada para poder acoplar el cuerpo de la bomba al revestimiento de la caldera. Se modela en latón, mediante los comandos *Pad*, *Hole* y *Edge Fillet*.

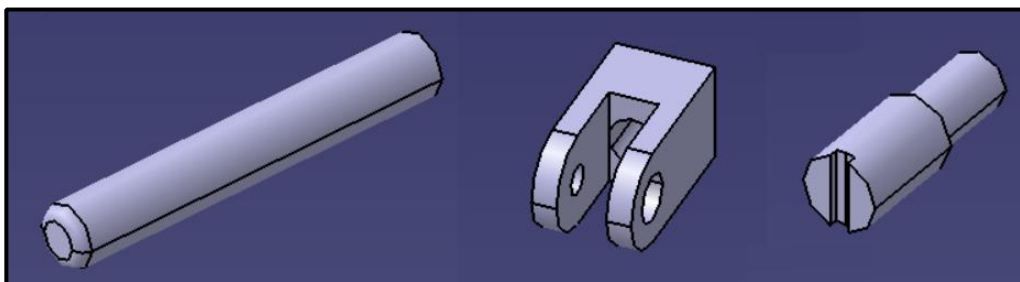


*Figura 68: Placa de montaje de la bomba de agua.*

#### 4.11.3 Water pump ram

El ariete o pistón de la bomba se encarga de generar el hipotético movimiento del agua en la línea de alimentación. Está conectado mediante una barra y los correspondientes engranajes, al movimiento del pistón principal del motor.

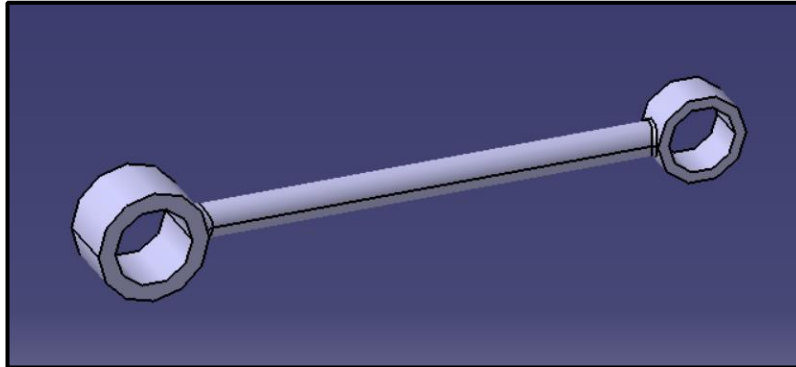
El ariete se compone de tres piezas de acero de sencillo modelado: el propio ariete o pistón, que va roscado a una horquilla, que se encarga de unirlo a la barra de transferencia mediante un pasador. Todas las piezas se generan con los comandos *Pad*, *Pocket*, *Hole* y *Thread*.



*Figura 69: Ariete de la bomba de agua.*

#### 4.11.4 Water pump connection rod

La barra de conexión entre el ariete y la rueda dentada de 60 dientes se fabrica en acero, y se genera mediante los comandos *Pad*, *Rib* y *Edge Fillet*. Además, se modelan dos casquillos de bronce que irán alojados en el interior de cada uno de los extremos.



*Figura 70: Barra de conexión de la bomba de agua.*

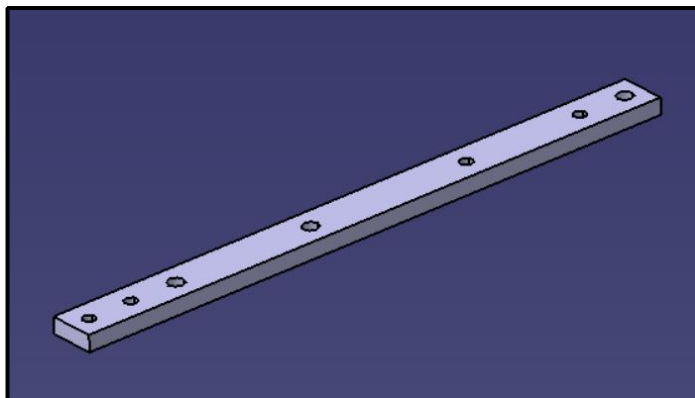
### 4.12 Base del motor

La base del motor sostiene tanto la estructura del cuerpo de la válvula de alimentación y cilindro, así como el sistema de poleas y bielas encargadas de transmitir el movimiento del cilindro a la rueda de inercia y los engranajes.

#### 4.12.1 Engine bed plate

La base va apoyada en su totalidad sobre la caldera y sirve de soporte tanto para el bloque de válvula y cilindro, como para el soporte del cigüeñal.

Está hecho de acero y su modelado resulta muy sencillo, no hay más que realizar un *Pad* rectangular y a continuación utilizar el comando *Hole* para realizar los diferentes taladros.



*Figura 71: Base del conjunto motor.*

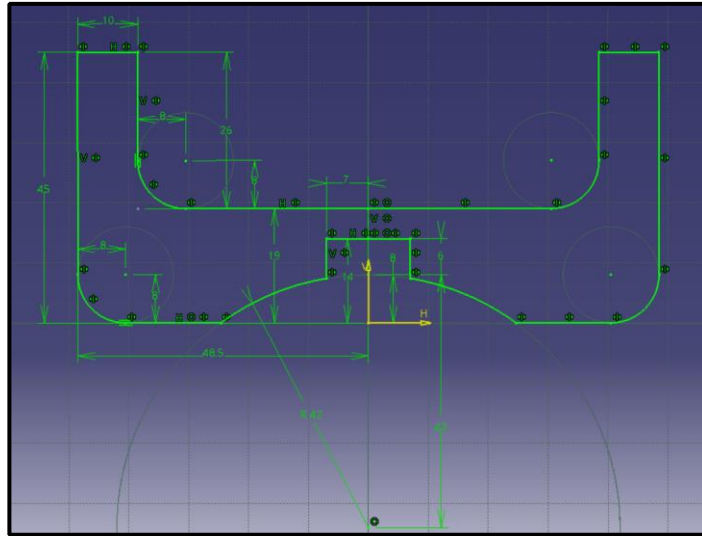
### 4.13 Soporte del cigüeñal

El soporte se encarga de soportar el peso de los elementos que conforman el cigüeñal, así como de alojar los rodamientos sobre los que girará el eje.

#### 4.13.1 Crank shaft bearing stand

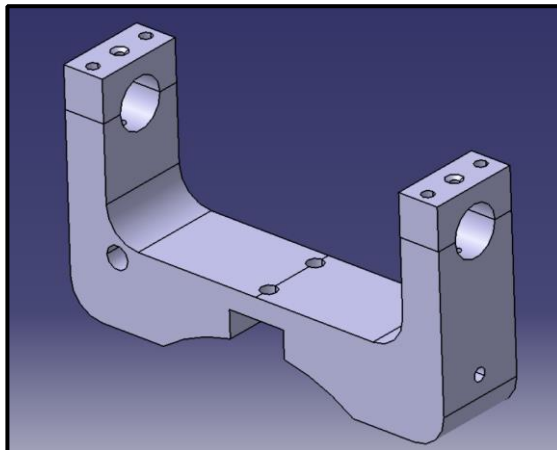
Para modelar el soporte, que está fabricado en acero, se realiza un *Sketch* con la sección de la pieza, que a

continuación será extrusionada mediante un *Pad*.



**Figura 72: Boceto del soporte del cigüeñal.**

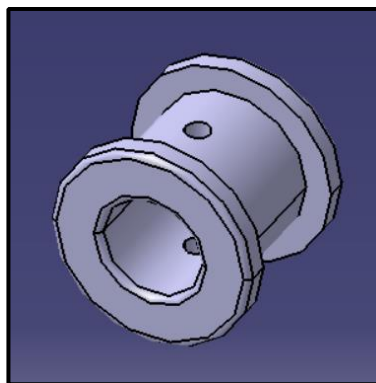
Una vez generado el cuerpo de la pieza, se utilizan los comandos *Pocket* y *Hole* para realizar los diferentes taladros y obtener la pieza final.



**Figura 73: Soporte del cigüeñal.**

#### 4.13.2 Crank shaft bearing

Los rodamientos sobre los que girará el eje del cigüeñal están fabricados en bronce, y se modelan fácilmente utilizando los comandos *Pad*, *Pocket* y *Edge Fillet*.



**Figura 74: Rodamientos del cigüeñal.**

## 4.14 Válvula cilíndrica de alimentación

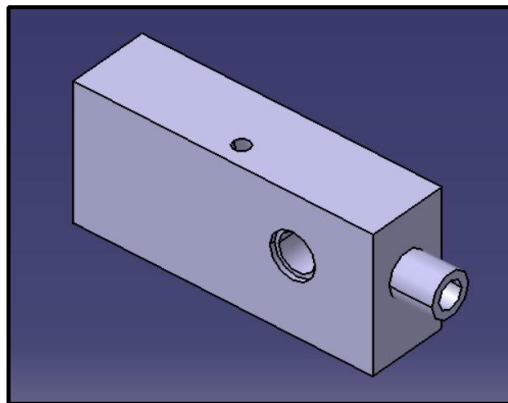
Como ya se comentó anteriormente, la válvula de alimentación se encarga de controlar el flujo de vapor en el cilindro. Esto implica tanto el control del vapor limpio que entra en el cilindro como el del vapor usado que ha de dirigirse hacia la chimenea.

### 4.14.1 Lower support port block

El bloque inferior, hecho en latón, tiene dos funciones principales: recibir el suministro de vapor limpio procedente de la caldera, y regular el flujo de vapor que entra en la válvula. Esta regulación se lleva a cabo mediante una manivela acoplada al soporte.

El modelado comienza con un *Pad* rectangular al que seguidamente se le realizan dos *Pockets* concéntricos en uno de sus laterales, en los que se alojará la manivela. A continuación, se realizan dos *Hole* roscados en la cara inferior del bloque; estos taladros servirán para alojar los tornillos de fijación del soporte a la base del motor. Seguidamente se realiza un *Pad* cilíndrico sobre la cara delantera del soporte. A la cara externa de esta extrusión se le dará rosca mediante el comando *Thread*, y se realizará un *Pocket* circular para vaciar el interior de la extrusión, quedando así definida la toma en la que se roscará la tubería de alimentación.

Por último, se realizan los dos conductos por los que fluirá el vapor en el interior del bloque. El primero de ellos, que discurre longitudinalmente, se genera mediante un *Pocket*. El Segundo, que discurre transversalmente y en cierto ángulo, se genera mediante el comando *Rib*. Este último conducto será el encargado de proporcionar el vapor de agua a la válvula.



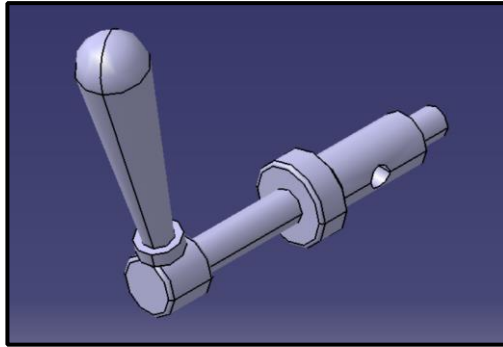
*Figura 75: Bloque inferior de la válvula de alimentación.*

### 4.14.2 Steam supply valve spindle

Esta manivela de corte se encarga de regular el flujo de vapor limpio que atraviesa el bloque inferior hacia la válvula. La manivela, al igual que el bloque al que va acoplada, está fabricada en latón, y su modelado se lleva a cabo de manera análoga a 4.7.3.

Para asegurar la estanqueidad de la conexión, se acopla una junta plana de goma en el alojamiento del bloque donde encaja la manivela.





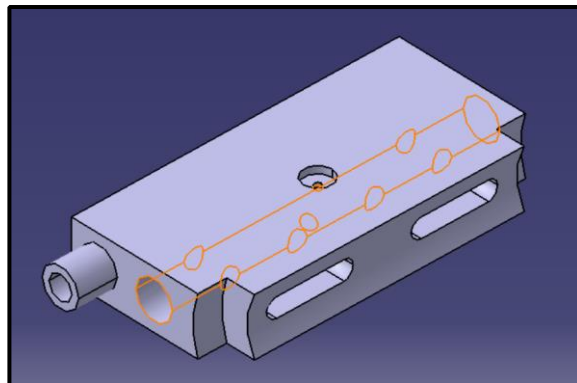
*Figura 76: Manivela reguladora del flujo de vapor en el bloque inferior de la válvula.*

#### 4.14.3 Valve chest

El cuerpo de la válvula es una de las piezas de mayor relevancia en todo el modelado. Se compone de un solo cuerpo, hecho en latón, y va soldado al bloque inferior. Se encarga de alojar el pistón que hace la función de válvula, así como de ofrecer los conductos necesarios para el correcto traspaso de vapor desde el bloque inferior al cilindro y desde el cilindro a la tubería de escape.

El modelado comienza con un *Pad* rectangular al que posteriormente se le realizan dos *Pockets* con semicircunferencias para generar las superficies de acoplamiento con el cilindro.

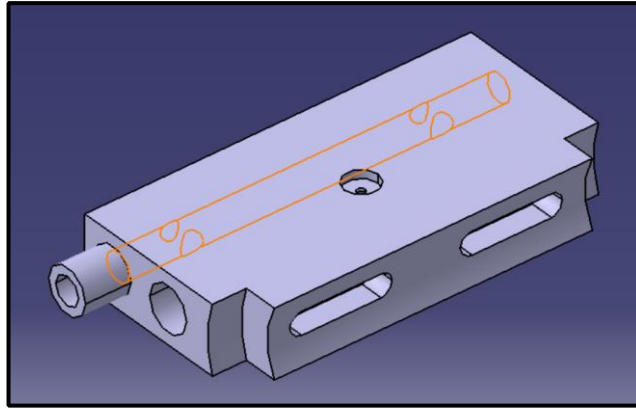
A continuación, se utiliza el comando *Pocket* para realizar un taladro circular que atraviesa la pieza longitudinalmente. Este conducto será el encargado de alojar el pistón en su movimiento lineal y servirá también como conducto principal de alimentación para el vapor “limpio” procedente del bloque inferior.



*Figura 77: Alojamiento del pistón en el cuerpo de la válvula.*

Seguidamente, se utilizan los comandos *Hole*, *Pad* y *Thread* para generar el cilindro roscado en el que encajarán la tubería de escape y su correspondiente tuerca de apriete. Este cilindro puede verse en la imagen anterior en la parte inferior izquierda.

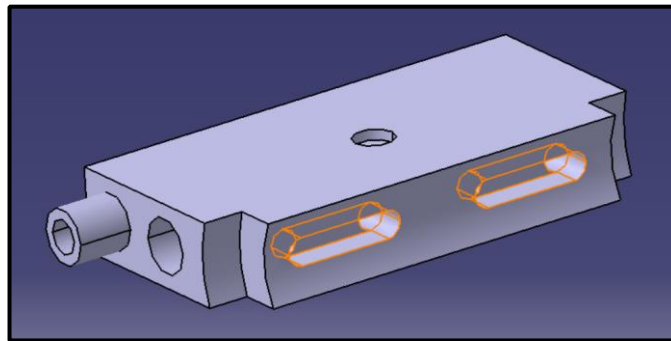
De nuevo se vuelve a utilizar el comando *Hole* para realizar un taladro circular que atraviesa la pieza longitudinalmente. En este caso, se trata del conducto de escape, que se encargará de dirigir el vapor “sucio” desde ambas cavidades del cilindro hacia la tubería de escape. En su extremo posterior se le da una rosca de M5 y 10mm de profundidad al taladro para alojar el correspondiente tornillo (la profundidad de la rosca no está definida en los planos originales, se toma la profundidad de 10mm al considerarse la adecuada para alojar el tornillo M5x8).



**Figura 78: Conducto de escape en el cuerpo de la válvula.**

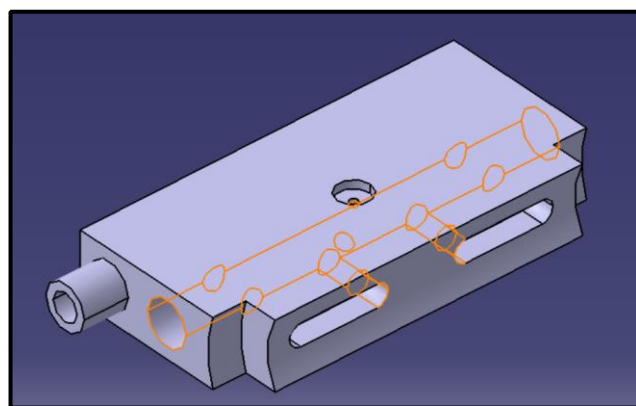
A continuación, se realizan dos taladros roscados de M4 en el lateral no visto de la imagen anterior, en los que se alojarán sendos tornillos. Además, se utiliza también el comando *Pocket* para realizar el alojamiento del lubricador; este alojamiento puede verse en la cara superior del cuerpo en la imagen anterior.

Se realizan también dos *Pockets* en la interfaz con el cilindro para conectar los conductos de admisión y escape con ambas cámaras del cilindro, tal y como puede observarse en la siguiente figura:

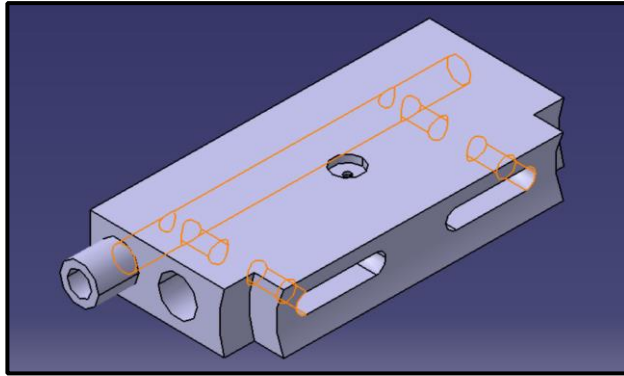


**Figura 79: Conexión entre los conductos de admisión y escape con ambas cámaras del del cilindro.**

Generados los conductos principales de admisión y escape, es necesario realizar los correspondientes *Pockets* que conecten dichos conductos con cada una de las cámaras del cilindro, como queda ilustrado en las siguientes figuras:

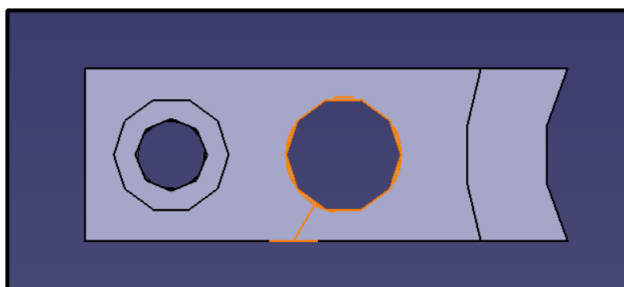


**Figura 80: Conductos de admisión hacia las cámaras del cilindro.**



**Figura 81: Conductos de escape hacia las cámaras del cilindro.**

Por último, se utiliza el comando *Slot* para generar el conducto por el que el vapor accede desde el bloque inferior de la válvula al conducto principal de alimentación.

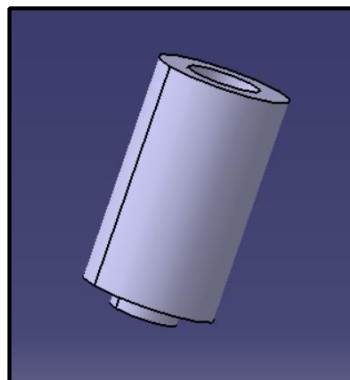


**Figura 82: Conducto de cebado de la válvula.**

#### 4.14.4 Oil pot

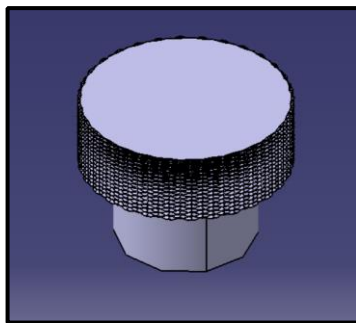
El depósito de aceite se colocará en su correspondiente alojamiento, directamente sobre la cara superior de la válvula. El alojamiento está alineado sobre el eje del conducto que aloja el pistón de la válvula, por lo que el continuo goteo de aceite permite lubricar la superficie de contacto entre pistón y conducto.

El modelado del depósito es sencillo, y se lleva a cabo con los comandos *Pad*, *Pocket* y *Hole*. El material utilizado es latón.



**Figura 83: Depósito de lubricante.**

También se modela el tapón de depósito de manera sencilla mediante *Pad* y *Thread*. El moleteado se realiza de manera análoga a 4.2.3. Para el ajuste estanco entre tapón y depósito, se modela la correspondiente junta de goma.

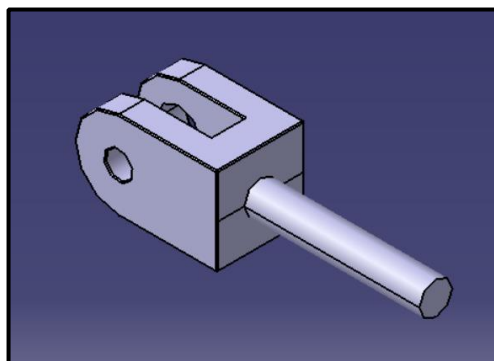


**Figura 84:** Tapón del depósito de lubricante.

#### 4.14.5 Cylindrical slide valve

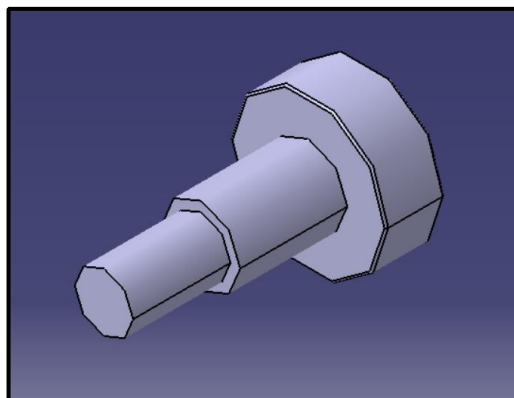
La válvula cilíndrica, como se ha comentado en anteriores ocasiones, se desliza de manera lineal a lo largo de su alojamiento en el cuerpo de la válvula, actuando como un pistón. Este movimiento, junto con su geometría, permite el bloqueo y apertura de los conductos de cebado y escape de cada una de las cámaras del cilindro.

La pieza se divide en tres partes, todas ellas hechas en acero. En primer lugar, se modela la horquilla, que está alojada en el exterior y sirve como interfaz de acoplamiento a la biela que provoca el movimiento del pistón. Esta pieza se modela, de manera análoga a otras similares, mediante los comandos *Pad*, *Pocket*, *Hole*, *Thread* y *Edge Fillet*.



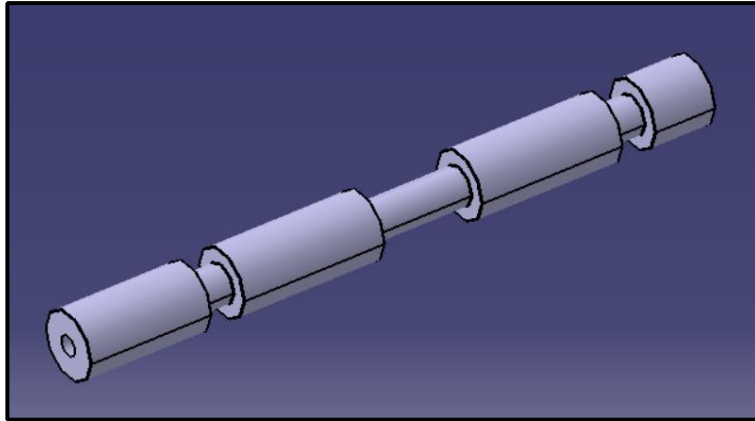
**Figura 85:** Horquilla de la válvula cilíndrica.

A continuación, se modela el pasador encargado de anclar la biela a la horquilla de la válvula. Su modelado es, de nuevo, análogo al de varias piezas similares previamente descritas.



**Figura 86:** Pasador de la válvula cilíndrica.

Por último, se modela el propio cuerpo de la válvula. Como puede observarse en la siguiente imagen, su geometría es muy sencilla, y el modelado se lleva a cabo utilizando únicamente los comandos *Pad*, *Edge Fillet* y *Hole*, usándose este último para generar el taladro roscado en el que encajará el vástago de la cabeza de la válvula.



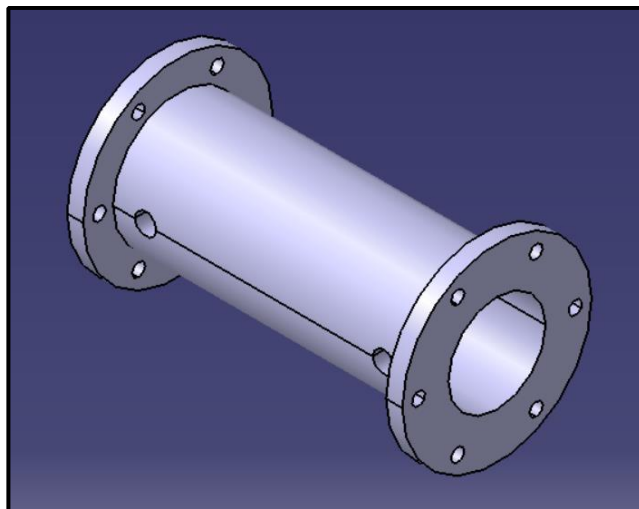
*Figura 87: Cuerpo de la válvula cilíndrica.*

## 4.15 Cilindro

El cilindro se encarga de alojar el pistón que genera el movimiento del sistema bajo la acción del vapor de agua. Su construcción debe asegurar la estanqueidad a las altas presiones de trabajo que se alcanzan en su interior.

### 4.15.1 Cylinder

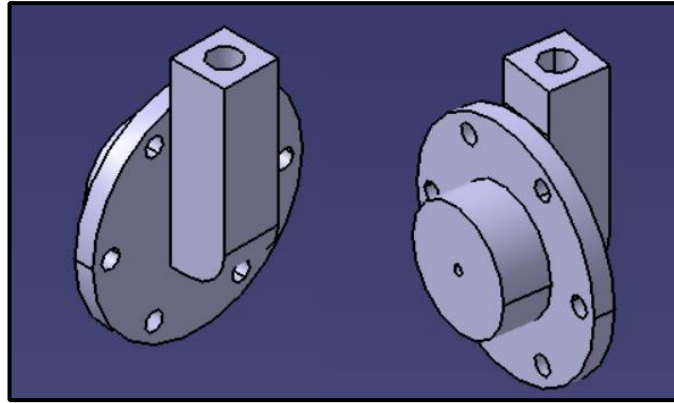
El cuerpo principal del cilindro está hecho en bronce. Como puede observarse en la siguiente imagen, su geometría no es compleja, pudiendo realizarse su modelado con los comandos *Pad*, *Pocket*, *Hole*, *Mirror* y *Circular Pattern*.



*Figura 88: Cuerpo principal del cilindro.*

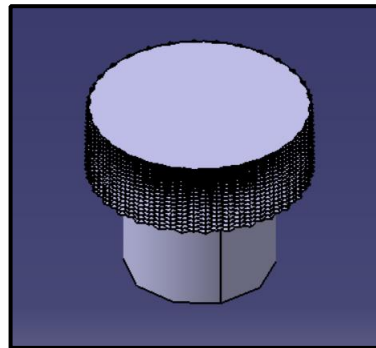
### 4.15.2 Cylinder front cover

La tapa frontal está también hecha de bronce, y posee taladros alineados con los del cuerpo principal para permitir el cierre. Además, dispone de un conducto (cerrado con su correspondiente tapón de latón) que comunica una de las cámaras del cilindro con el exterior.



**Figura 89: Tapa frontal del cilindro.**

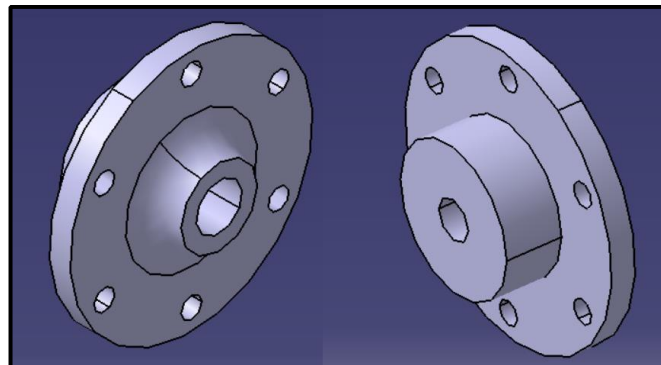
De nuevo, su modelado resulta sencillo y se realiza con los mismos comandos que el cuerpo principal. El tapón que cierra el conducto vertical posee un acabado moleteado que se realiza de manera análoga a 4.2.3. Junto a él, se modela también la correspondiente junta de goma para asegurar la estanqueidad.



**Figura 90: Tapón de la tapa frontal del cilindro.**

#### 4.15.3 Cylinder rear cover

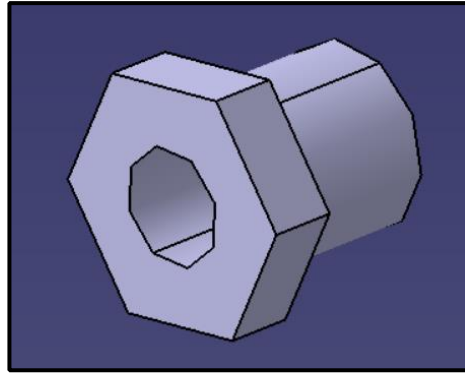
En el caso de la tapa posterior del cilindro, se utilizan, además de los comandos mencionados para la tapa frontal, los comandos *Revolute* y *Close Surface*, con los que se consigue obtener la superficie exterior de la tapa.



**Figura 91: Tapa trasera del cilindro.**

Como puede observarse en la imagen anterior, en este caso la apertura central de la tapa es de mayor diámetro, ya que será atravesada por el vástago del pistón que se aloja dentro del cilindro.

En el alojamiento del vástago se instala un casquillo roscado de cabeza hexagonal, que ajusta contra la tapa a través de una junta.



*Figura 92: Casquillo roscado de la tapa posterior.*

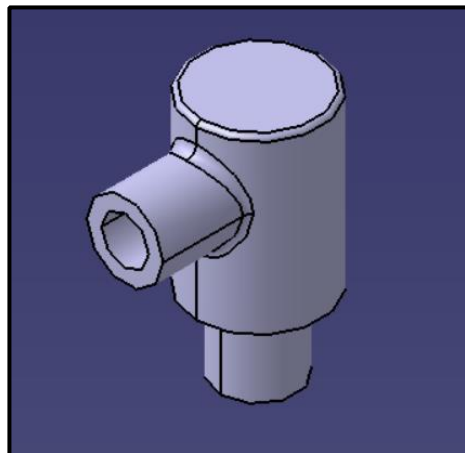
## 4.16 Tuberías y conexiones

A continuación, se detallará el modelado de las diferentes tuberías y conexiones que se utilizan para dirigir los flujos de vapor en el sistema, tanto el cebado desde la caldera al bloque inferior de la válvula, como el escape desde la válvula a la chimenea.

### 4.16.1 Steam supply elbow connector

Este conector, de tipo codo a 90° y fabricado en latón, va roscado en uno de sus extremos a su correspondiente casquillo en la caldera. En el otro extremo, conecta con la tubería de cebado que va al bloque inferior de la válvula.

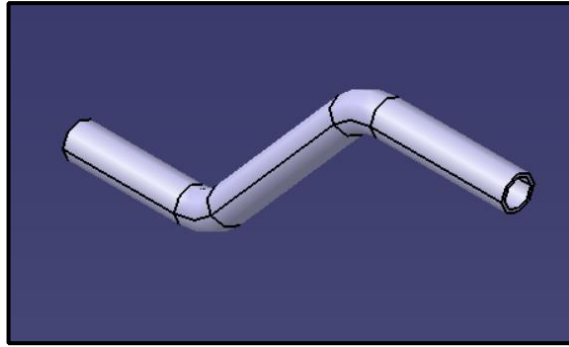
El modelado del conector se realiza mediante los comandos *Pad*, *Pocket*, *Thread* y *Edge Fillet*.



*Figura 93: Conector de alimentación de vapor.*

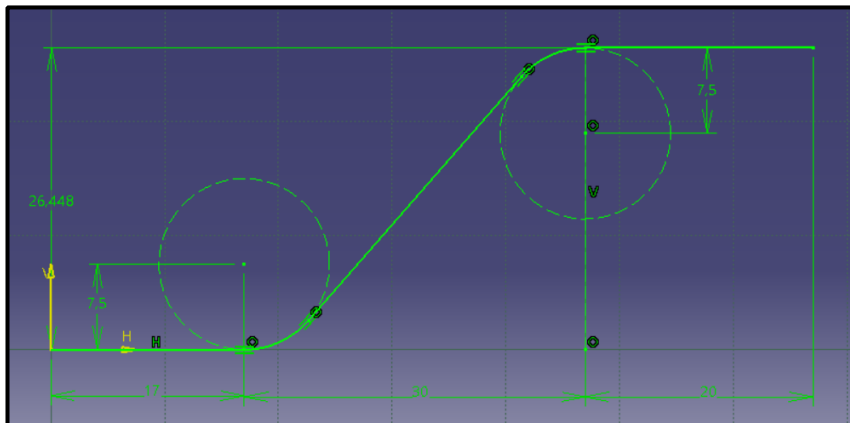
### 4.16.2 Steam supply pipe

Esta tubería, fabricada en cobre, es la encargada de conducir el vapor “limpio”, procedente de la caldera, desde el conector acodado hasta el bloque inferior de la válvula. En ambos extremos se asegura su unión mediante la tuerca roscada que se describirá en el próximo apartado.



**Figura 94: Tubería de alimentación.**

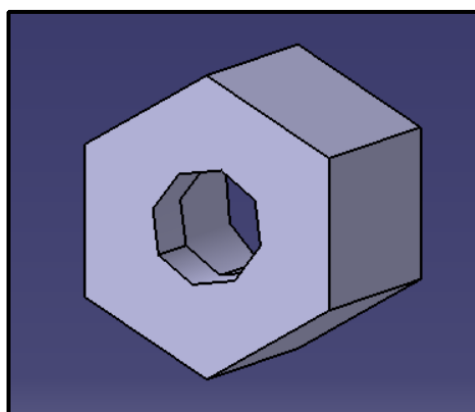
Se utiliza el comando *Rib* para extrusionar un perfil en forma de corona circular a lo largo de la directriz generada en el siguiente boceto:



**Figura 95: Boceto.**

#### 4.16.3 Steam supply pipe nut

Esta tuerca de apriete, hecha en acero, se encarga, junto con su correspondiente junta de goma, de fijar las tuberías que conducen el vapor contra todos sus conectores. Está fabricada en acero y se modela mediante los comandos *Pad*, *Pocket* y *Hole*.

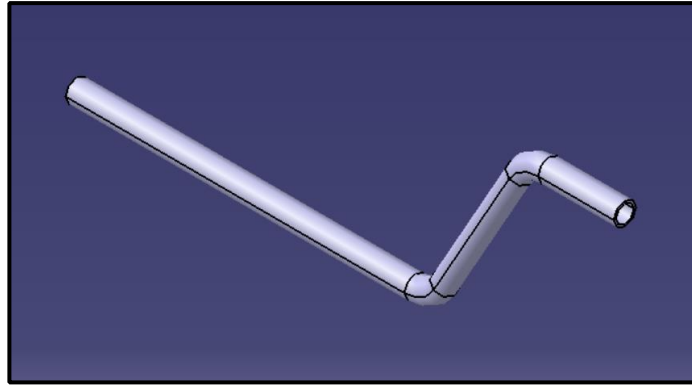


**Figura 96: Tuerca de apriete.**

#### 4.16.4 Steam exhaust pipe Part-1

Esta tubería, fabricada en cobre, es la encargada de conducir, en su primer tramo, el vapor “sucio”, procedente de la válvula, hasta la chimenea, atravesando el soporte del cigüeñal. Al igual que la tubería de alimentación, se modela mediante el comando *Rib*.

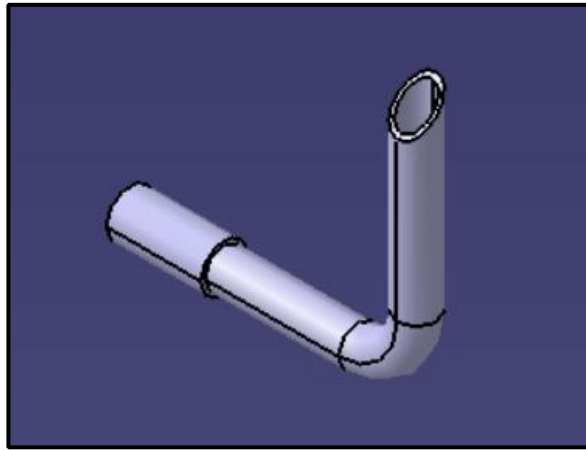




*Figura 97: Tubería de escape, tramo 1.*

#### 4.16.5 Steam exhaust pipe Part-2

Este segundo tramo de la tubería de escape comienza después del soporte del cigüeñal, y mediante un codo de 90° dirige el vapor hacia la entrada de la chimenea.



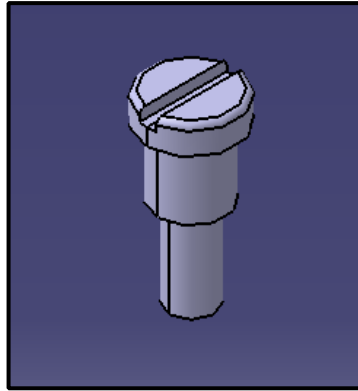
*Figura 98: Tubería de escape, tramo 2.*

### 4.17 Mecanismo del motor

El mecanismo del motor es el encargado de transformar el movimiento lineal recíproco del pistón en un movimiento de rotación. Además, utiliza este movimiento de rotación para mover la bomba de agua, y para mover la válvula reguladora de vapor.

#### 4.17.1 Large gear wheel axle screw

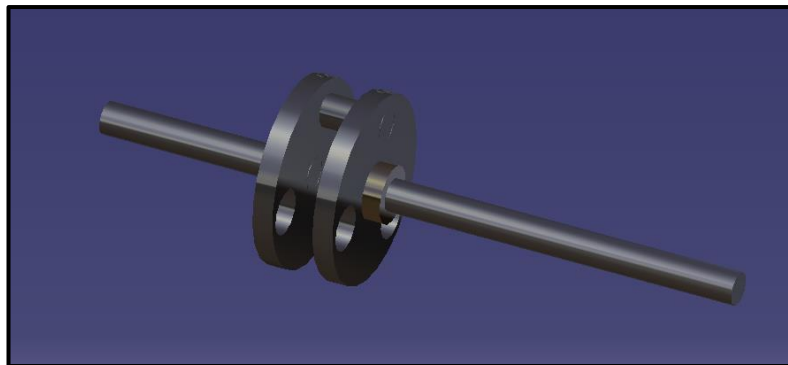
Este tornillo se encarga de fijar la rueda dentada de 60 dientes contra el soporte del cigüeñal. Está hecho en acero y se modela mediante los comandos *Pad*, *Pocket*, *Thread* y *Edge Fillet*.



**Figura 99:** Tornillo de fijación de la rueda dentada de 60 dientes.

#### 4.17.2 Crankshaft

El cigüeñal se encarga de transformar el movimiento rectilíneo del pistón en un movimiento de rotación. Está formado por varias piezas: dos ejes cilíndricos de diferente longitud, dos discos de inercia, un casquillo y un pasador de unión entre ambos discos. Como puede verse en la siguiente figura, en la que se muestra el conjunto del cigüeñal montado, las geometrías son sencillas, pudiendo modelarse todas las piezas con *Pad*, *Pocket*, *Hole* y *Thread*.

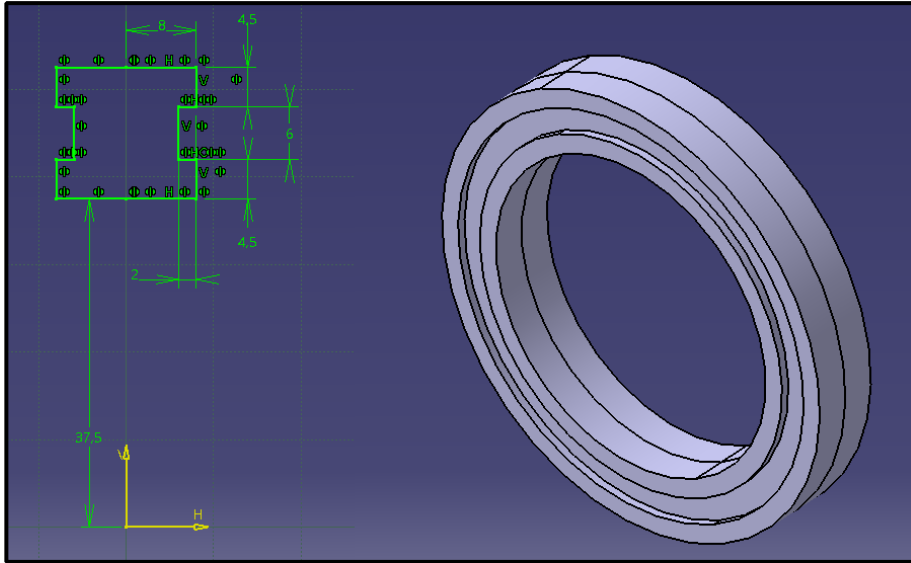


**Figura 100:** Cigüeñal.

#### 4.17.3 Flywheel

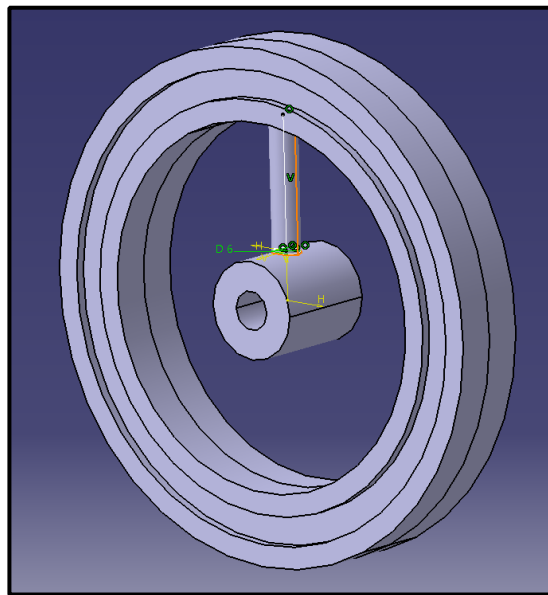
La rueda, en el caso de esta maqueta, tiene el único propósito de ejemplificar el movimiento de rotación que se consigue al poner en funcionamiento la máquina de vapor.

A pesar de su mera función ilustrativa, el modelado de esta pieza es uno de los más complejos. Para empezar, se realiza un boceto con la sección transversal del aro exterior. Seguidamente, se define el eje de revolución en otro boceto diferente y se utilizan los comandos *Revolute* y *Close Surface* para generar el aro completo.



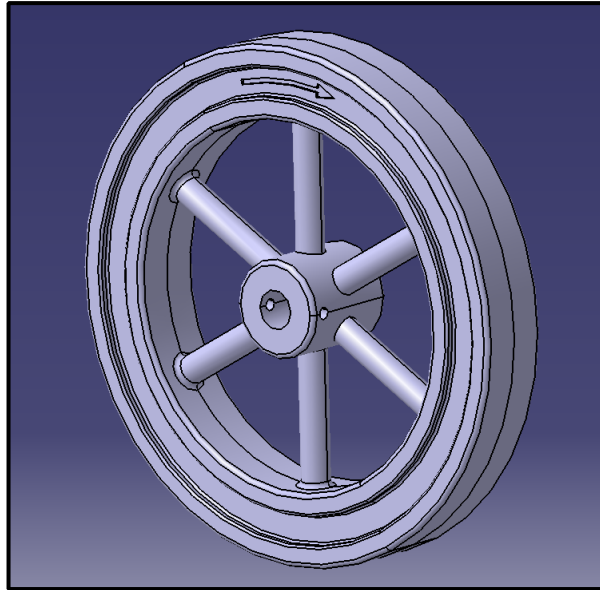
**Figura 101: Sección transversal y aro exterior revolucionado.**

A continuación, se realiza un *Pad* cilíndrico para generar el eje central de la rueda. Una vez obtenido el eje, se procederá a modelar uno de los radios. Para ello, se realiza un boceto en el que se define una línea recta que une un punto sobre la superficie exterior del eje con otro punto sobre la superficie interior del aro. Esta línea servirá de guía para realizar un *Rib* de sección circular (al realizarlo, se marca la opción *Merge rib's ends* para generar una geometría de transición en las uniones con el eje y el aro).



**Figura 102: Obtención de un radio mediante el comando Rib.**

Para generar los cinco radios restantes, se utiliza el comando *Circular Pattern*. A continuación, se utiliza *Edge Fillet* para suavizar aristas y *Hole* para realizar dos agujeros en el eje que permitirán fijar la rueda al cigüeñal. Por último, se realiza un *Pocket* con la silueta de una flecha sobre el aro exterior para indicar el sentido de giro de la rueda.

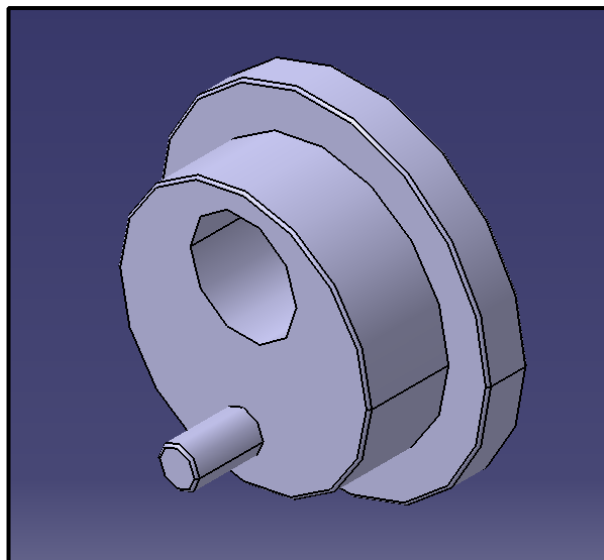


**Figura 103: Modelo final de la rueda.**

#### 4.17.4 Eccentric sheave

Acoplado al eje del cigüeñal se encontrará un conjunto excéntrico, cuya función será la de transformar el movimiento rotatorio del cigüeñal en un movimiento rectilíneo que será transmitido al pistón de la válvula. Este conjunto está formado por varias piezas, siendo la primera de ellas la roldana excéntrica que se describe a continuación.

Esta roldana, fabricada en acero, se modela con los comandos *Pad*, *Pocket* y *Edge Fillet*. En primer lugar, se realizan las dos extrusiones cilíndricas que conforman la pieza. Sobre la extrusión de mayor grosor se agarrará la biela encargada de transmitir el movimiento hacia el pistón de la válvula. A continuación se realiza un *Pocket* para generar un taladro pasante, desplazado del centro de los cuerpos cilíndricos. Este taladro alojará el eje del cigüeñal, y permitirá el giro de la pieza alrededor del mismo.



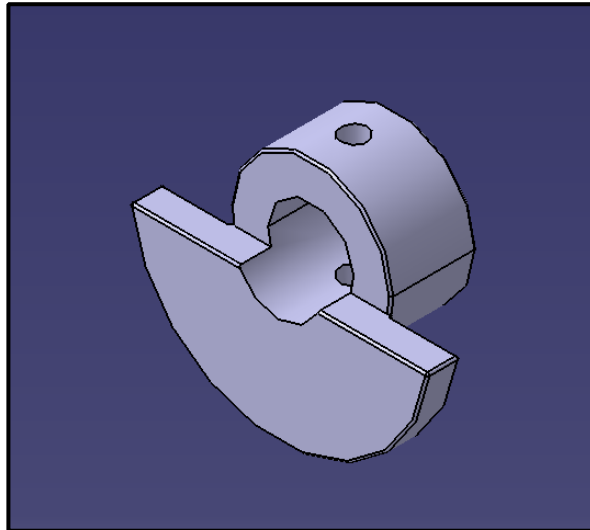
**Figura 104: Roldana excéntrica.**

Por último, se extruye un pequeño cilindro que marca el punto de máxima excentricidad. Este cilindro, movido por el contacto con el disco de arrastre que se verá en el próximo punto, será el que provoque el giro de la pieza alrededor del eje del cigüeñal.

#### 4.17.5 Eccentric slip disc

Este disco de arrastre, como se ha comentado anteriormente, gira solidariamente con el eje del cigüeñal, y al hacer contacto con la guía de la excéntrica, fuerza el giro de esta.

La pieza está fabricada en acero, y para su modelado se realizan dos *Pads* cilíndricos para seguidamente hacer el vaciado central mediante el comando *Pocket*. De nuevo, se realiza otro *Pocket* para seccionar el cilindro de menor espesor y crear así la superficie plana de arrastre.



*Figura 105: Disco de arrastre de la excéntrica.*

Una vez generada la geometría principal, se realizan dos taladros roscados sobre el anillo. Estos taladros permitirán fijar la pieza al eje del cigüeñal. Por último, se suavizan las aristas mediante *Edge Fillet*.

#### 4.17.6 Crankshaft gear wheel 24T

Esta rueda dentada de 24 dientes, fabricada en acero, va acoplada directamente al eje del cigüeñal y engrana con la rueda de 60 dientes que transmite la rotación a la biela del pistón de la bomba de agua.

En el caso de esta rueda, se ha modificado la cota del diámetro primitivo ( $D_p$ ) del engranaje. Esto se debe a que con las cotas proporcionadas en los planos, los módulos de ambas ruedas no eran coincidentes. Ante esta tesitura, se optó por mantener el módulo de la rueda de 60 dientes y modificar el diámetro primitivo de la de 24 dientes.

Como punto de partida para generar la geometría del diente, que se hará mediante un perfil de arco aproximado de evolvente, se tienen los siguientes datos:

$$\left. \begin{array}{l} \phi_e = 20 \text{ mm} \\ \phi_p = 18.4 \text{ mm} \\ \phi_i = 20 \text{ mm} \\ Z = 24 \end{array} \right\}$$

A partir de estos datos, obtenemos, en primer lugar, el módulo ( $m$ ). A partir de este dato se obtienen el paso ( $p$ ) y el espesor del diente ( $e$ ). Además, se elige un ángulo de presión de los dientes de  $\alpha = 20^\circ$ .



#### 4.17.7 Pump crank gear wheel 60T

Esta rueda dentada de 60 dientes, fabricada también en acero, se encarga de convertir su movimiento de rotación en un movimiento lineal en la biela de la bomba de agua.

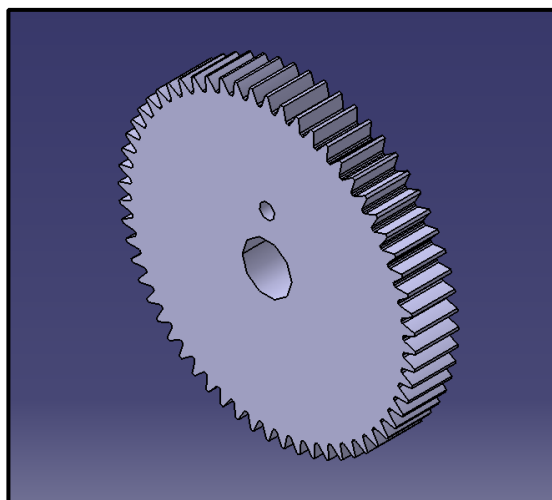
Como punto de partida para generar la geometría del diente, que se hará mediante un perfil de arco aproximado de evolvente, se tienen los siguientes datos:

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_e = 48 \text{ mm} \\ \phi_p = 46 \text{ mm} \\ \phi_i = 44 \text{ mm} \\ Z = 60 \end{array} \right\}$$

A partir de estos datos, obtenemos, en primer lugar, el módulo ( $m$ ). A partir de este dato se obtienen el paso ( $p$ ) y el espesor del diente ( $e$ ). Además, se elige un ángulo de presión de los dientes de  $\alpha = 20^\circ$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} m = \frac{\phi_p}{Z} = 0.76667 \\ p = \pi m = 2.40855 \\ e = 0.5p = 1.20428 \end{array} \right\}$$

Obtenidos los parámetros, se genera la geometría del diente trazando un arco aproximado de evolvente, siguiendo el mismo método que para la rueda anterior. Una vez generada la geometría del diente, se realiza un *Pad* del boceto y se utiliza *Circular Pattern* para replicar el diente 60 veces a lo largo de la corona completa. Por último, se realizan dos *Pockets* circulares: uno para alojar el tornillo que fijará la rueda al soporte del cigüeñal, y otro para alojar el tornillo sobre el que agarrará la biela de la bomba.



**Figura 108: Rueda dentada de 60 dientes.**

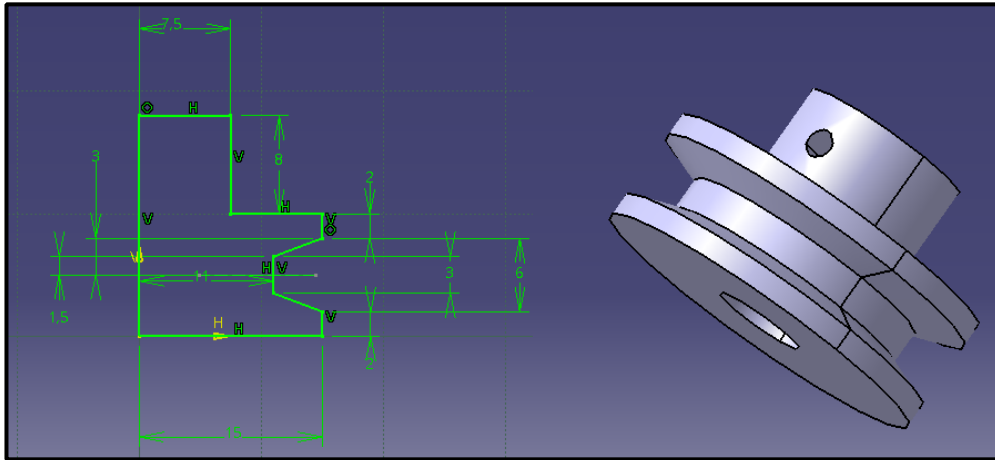
Pertenecientes al mismo distintivo de pieza, se modelan también los tornillos previamente mencionados, así como un casquillo y una arandela. Al ser su modelado muy sencillo, no se detalla en este apartado, y serán mencionados durante el ensamblado.

#### 4.17.8 Pulley

Esta polea se ubica en uno de los extremos del cigüeñal y es la encargada de poder transmitir el giro generado a un consumidor externo. Queda pues a criterio del modelista la opción de utilizarla (por ejemplo, para unirla

mediante una correa de goma a un pequeño alternador que genere corriente alterna).

Para su modelado, se realiza un boceto con su sección transversal. Acto seguido, se utiliza *Revolute* y *Close Surface* para generar la geometría por revolución del boceto anterior.



**Figura 109: Sección transversal y polea revolucionada.**

Por último, se realiza un *Pocket* circular para permitir el paso del eje del cigüeñal, y dos taladros roscados que permitirán fijar la polea al eje.

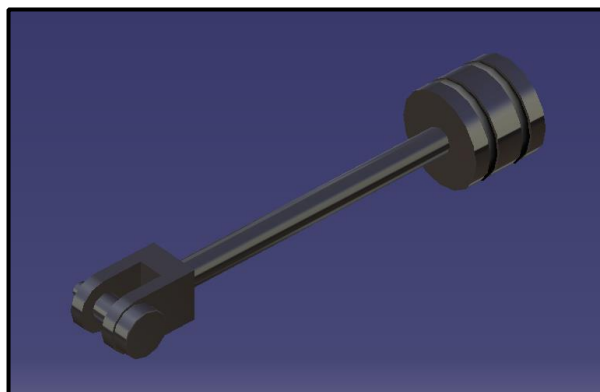
#### 4.17.9 Piston + rod

A continuación, se detallará el modelado del pistón que, alojado en el interior del cilindro, genera el movimiento del sistema bajo la acción del vapor de agua a alta presión.

En primer lugar, se genera el propio pistón. Para ello, se realizan 5 *Pads* cilíndricos para obtener el cuerpo del pistón con sus correspondientes alojamientos para las juntas. Para poder alojar el vástago, se realiza un *Hole* de M4 que atraviesa todo el pistón. Se aplica como material acero, al no disponer la librería de materiales de CATIA de acero inoxidable. Para modelar el O-Ring, se utiliza el comando *Rib*.

Para generar el vástago, se realiza en primer lugar un *Pad* cilíndrico de 5mm de diámetro. A continuación, se realiza otro *Pad* de 4mm de diámetro y se le da rosca M4 a su superficie externa mediante *Thread*. Por último, se realiza en el extremo contrario otro roscado de M5 para fijar el vástago a la horquilla.

Tanto la horquilla de unión con la biela como el pasador son análogos a 4.11.3.



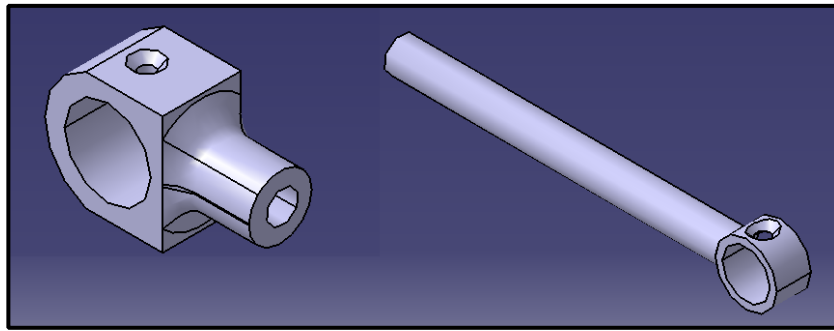
**Figura 110: Pistón, vástago, O-rings y enganche.**

#### 4.17.10 Connection rod

Formada por dos piezas, esta biela une el vástago del cilindro con el cigüeñal, transformando el movimiento lineal en uno de sus brazos en una rotación en el brazo contrario. La primera de las piezas consta de un brazo cilíndrico roscado en uno de sus extremos, mientras que en el otro se dispone en forma de anillo. Será este segundo extremo el que enganche con el vástago del cilindro. La segunda pieza es otro anillo, de geometría



diferente, será la encargada de conectar con el cigüeñal.



**Figura 111: Biela del pistón.**

Cabe recalcar que, para lograr la geometría de la segunda de las piezas, ha sido necesario utilizar el comando *Multi-sections Solid* para obtener la transición entre el eje cilíndrico y la cara plana de la cabeza.

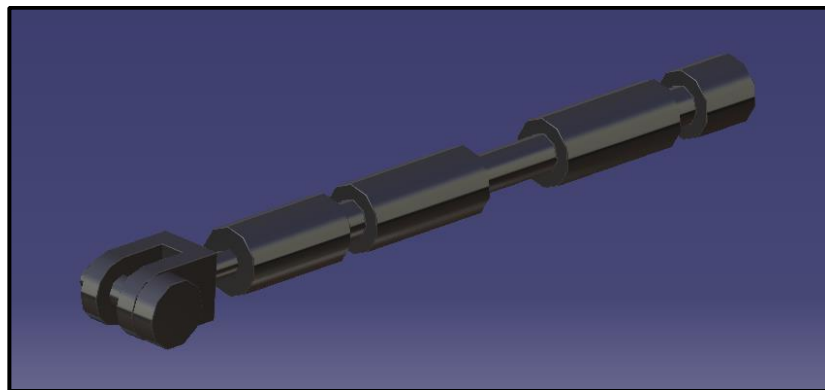
Ambas piezas están hechas de acero, y, tal y como se puede observar en la imagen anterior, constan de un taladro abierto en cada uno de los extremos. Estos taladros permiten lubricar la interfaz entre biela y casquillo (el modelado de los casquillos no se detalla en este punto por su extremada sencillez, pero se verán más adelante durante el ensamblado).

#### 4.17.11 Cylindrical slide valve

La válvula cilíndrica de alimentación de vapor es, como se ha comentado en anteriores ocasiones, la encargada de regular los flujos de entrada y salida de vapor en el cilindro. Desde el punto de vista mecánico, no deja de ser un eje unido a varios pistones que taponan o liberan conductos a medida que se desplazan longitudinalmente.

El modelado de la válvula es muy sencillo, puesto que únicamente hay que realizar *Pads* cilíndricos de diferentes longitudes y diámetros. También es necesario usar *Hole* para hacer un taladro roscado ciego en el que roscará la horquilla de unión con la biela que gobierna el movimiento de la válvula.

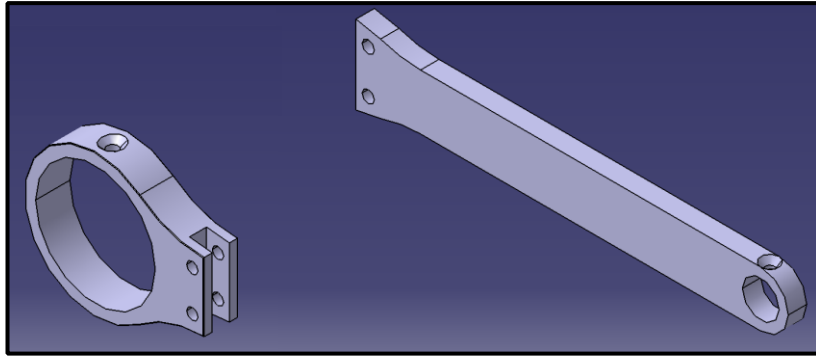
De nuevo, el modelado de la horquilla y el pasador se hace de forma análoga a 4.11.3.



**Figura 112: Válvula cilíndrica y enganche.**

#### 4.17.12 Eccentric strap

Esta biela une la válvula cilíndrica con la excéntrica del cigüeñal. Al igual que la biela del pistón, está compuesta de dos piezas. La primera de ellas es una abrazadera que rodeará el cuerpo de la excéntrica, y su modelado no entraña complejidad, empleándose para ello los comandos *Pad*, *Pocket*, *Hole* y *Edge Fillet*. La segunda de las piezas es el propio brazo de la biela, que presenta un agujero en el que engancha con la válvula.



***Figura 113: Biela de la válvula cilíndrica.***

De nuevo, al igual que en la anterior biela, se realizan taladros para permitir la lubricación entre biela y casquillos. Además, en este caso, la unión entre ambas piezas no es roscada, sino que se realiza mediante dos pines que encajan a presión (el modelado de los pines y los casquillos es omitido en este paso por su sencillez, pero serán tratados más adelante durante el ensamblado del conjunto motor).

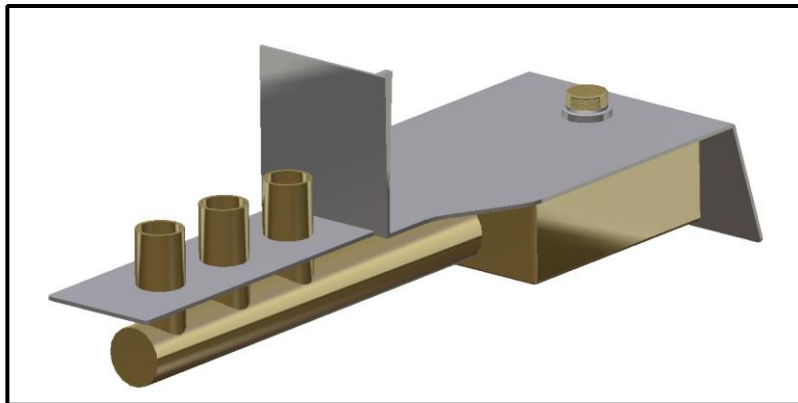
## 5 ENSAMBLAJE

Una vez modeladas todas las piezas de la lista de partes, en este capítulo se va a describir el proceso seguido para ensamblar los diferentes subconjuntos que conforman la máquina de vapor, hasta llegar al conjunto final. Para ello, se hará uso del módulo *Assembly Design*.

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, las normales utilizadas para el ensamblaje (tornillos, tuercas, etc.) se han obtenido siempre de las librerías de CATIA. En los casos en los que alguna normal no se encontrase disponible en las librerías, se han modificado las paramétricas de los *sketches* para obtener las dimensiones deseadas.

### 5.1 SA-1-101

En este primer *Sub-Assembly* se ensambla el tanque combustible con su correspondiente tapa y tapón de relleno. Para ello, se utiliza en primer lugar el comando *Coincidence Constraint* para alinear dos de los ejes verticales de los quemadores con sus respectivas aperturas circulares en la tapa. A continuación, se utiliza *Contact Constraint* para forzar el contacto entre la cara inferior de la tapa y la cara superior del depósito.

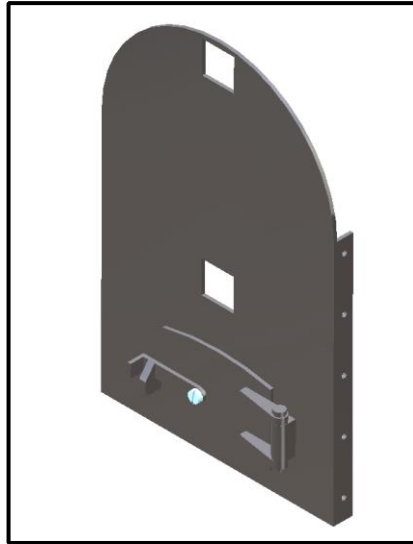


*Figura 114: Subconjunto SA-1-101.*

Por último, se posiciona el tapón. Para ello, se alinean los ejes del tapón y de la junta con el agujero correspondiente en la tapa mediante *Coincidence Constraint*. Seguidamente, se utiliza *Contact Constraint* para forzar el contacto entre la cara superior de la tapa y una de las caras de la junta, así como entre la cara opuesta de la junta y la cara inferior de la cabeza del tapón.

### 5.2 SA-1-102

Este sencillo subconjunto ensambla las diferentes piezas que componen la tapa trasera equipada de la cámara de combustión. Para empezar, se realiza un *Coincidence Constraint* para alinear el eje de la bisagra con los brazos de la compuerta. A continuación, se utiliza *Contact Constraint* para fijar el contacto entre la bisagra y alguna de las caras interiores de los brazos de la compuerta, quedando así definida la posición y libertad de giro de la compuerta alrededor de la bisagra. Por último, se repiten estos pasos con el pasador de la bisagra.

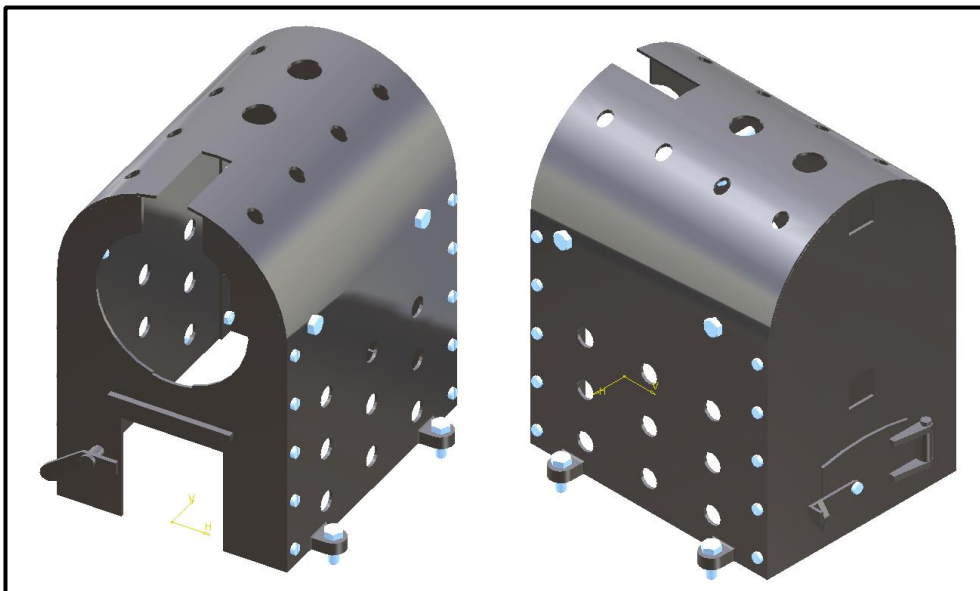


**Figura 115: Subconjunto SA-1-102.**

De nuevo se utilizan los comandos *Coincidence Constraint* y *Contact Constraint* para alinear el soporte del pestillo con su agujero roscado y para fijar su posición. Finalmente, se alinea y posiciona el pasador del pestillo sobre la compuerta y se fija su posición mediante un tornillo M3 y su correspondiente tuerca.

### 5.3 SA-1-103

Este *Sub-Assembly* engloba todo el conjunto de la cámara de combustión. En primer lugar, se posicionan, mediante *Coincidence Constraint* y *Contact Constraint* los 4 tornillos M5x14 de cabeza hexagonal que fijan el conjunto de la cámara de combustión a la placa base. Utilizando los mismos comandos, se posicionan también los 4 tornillos M5x12 de cabeza hexagonal que, ubicados en los laterales de la cámara de combustión, se encargarán de fijar la caldera a través de sus correspondientes soportes.



**Figura 116: Subconjunto SA-1-103.**

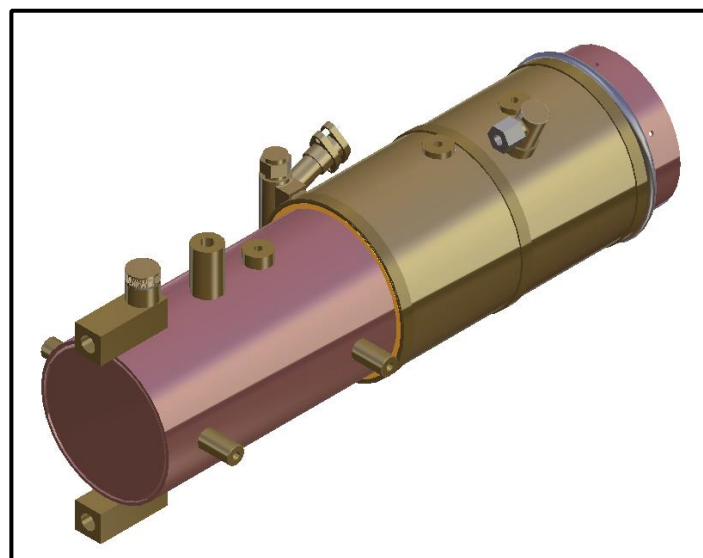
Por último, se ensamblan las tapas delantera y trasera. Para ello, se establece el contacto entre las caras laterales de las tapas y las de la cubierta, y se alinean los ejes de los taladros de unión. Hecho esto, solo queda colocar los 20 tornillos M3x6 y sus correspondientes tuercas para fijar las tapas en posición.

## 5.4 SA-1-104

Este *Sub-Assembly* agrupa todas las piezas que conforman la caldera. Para empezar, se posicionan el aislador y el recubrimiento sobre el propio cuerpo de la caldera. Para ello, se hacen coincidir los ejes longitudinales de los cilindros y los ejes correspondientes a los taladros pasantes donde irá ubicado el conector en codo de suministro de vapor. Además, en el caso del aislador, se impone también un contacto superficial entre la cara plana de uno de sus extremos y el saliente que presenta el cuerpo de la caldera en su parte inferior. Para fijar estos tres elementos, se posiciona el anillo que hará de interfaz con el colector de escape; para ello se hace coincidir su eje con el de la caldera y se impone, de nuevo, el contacto superficial entre la cara plana del anillo y la del aislador.

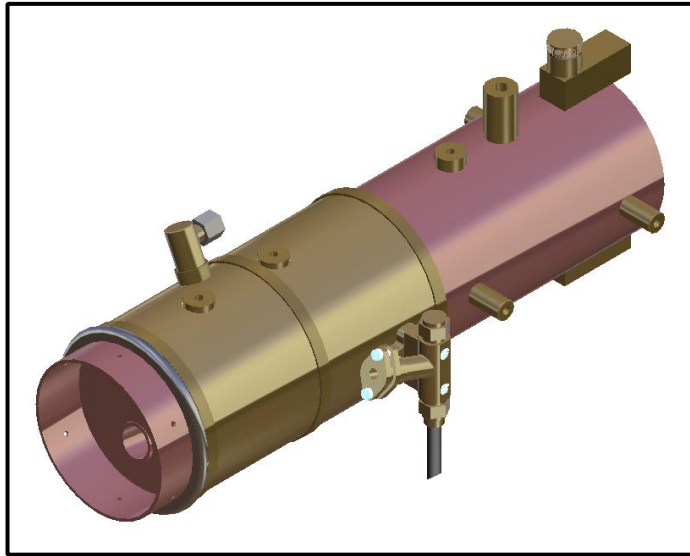
A continuación, se posicionan los soportes y casquillos que integrarán el subconjunto con el resto de los elementos del modelo. Para colocar las barras portantes, se hacen coincidir sus ejes longitudinales con los de sus respectivos taladros en el cuerpo de la caldera, para seguidamente establecer un *Offset Constraint* entre una de las caras planas del soporte y el eje de la caldera. Para posicionar los diferentes casquillos se procede siempre de la misma manera: se utiliza *Coincidence Constraint* para hacer coincidir el eje del casquillo con el de su correspondiente taladro y mediante *Offset Constraint* se fija la distancia correspondiente entre la cara plana de apoyo del casquillo y el eje de la caldera. En el caso de los casquillos que conectan con el indicador de nivel, es necesario además establecer la condición de paralelismo entre una de las caras cuadradas del casquillo y cualquiera de las tapas de la caldera.

Una vez posicionados todos los casquillos, se colocan el tapón de relleno de agua de la caldera y el conector codo de alimentación de vapor. Para el tapón, se hace coincidir su eje con el de la junta y el del conducto vertical del casquillo superior del indicador de nivel. A continuación, se establecen los pertinentes contactos superficiales entre casquillo, junta y tapón. En el caso del conector en codo, se hace coincidir su eje vertical con el de su correspondiente casquillo y se establece el contacto superficial entre sus dos caras. A continuación, se hacen coincidir los ejes del otro conducto del conector, la junta y la tuerca de apriete. Por último, se establecen los contactos superficiales entre conector, junta y tuerca.



**Figura 117: Subconjunto SA-1-104.**

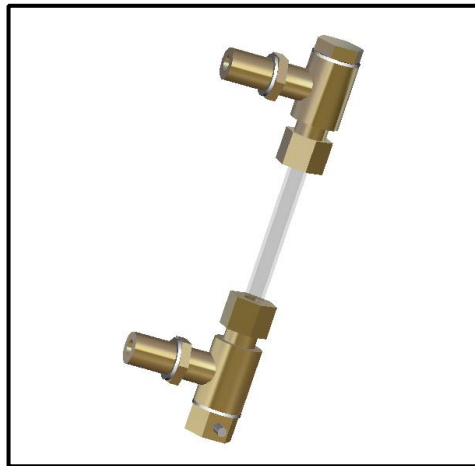
Para finalizar el subconjunto, solo queda la instalación de la bomba de agua. Al quedar la propia bomba montada en un subconjunto posterior (SA-1-108), en este apartado solo nos ocuparemos de posicionarla sobre la caldera. Para ello, hacemos coincidir los ejes de los dos tornillos de fijación del soporte de la bomba con los de sus correspondientes casquillos. Basta entonces con establecer el contacto entre la cara posterior del soporte de la bomba con la cara plana externa de los casquillos para fijar el subconjunto a la caldera.



*Figura 118: Subconjunto SA-1-104, detalle de la bomba de agua.*

## 5.5 SA-1-105

Este *Sub-Assembly* engloba el indicador de agua de la caldera. Al ser un conjunto prácticamente simétrico, se describirá solo el ensamblado del cuerpo superior. En primer lugar, se posiciona mediante *Coincidende Constraint* y *Contact Constraint* la junta que asegura la estanqueidad entre el cuerpo y el casquillo superior de la caldera. A continuación, se utilizan los mismos comandos para posicionar el tapón superior y la tuerca de apriete de la tubería, ambos con sus respectivas juntas de estanqueidad. Para colocar la tubería, se utiliza de nuevo *Coincidence Constraint* para alinear su eje y *Offset Constraint* para posicionarla.



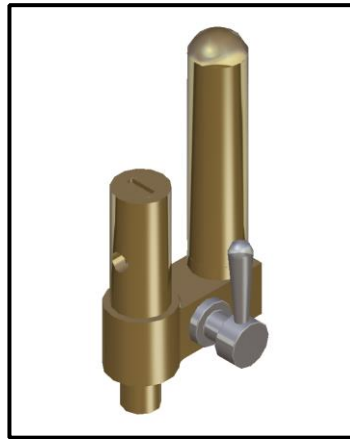
*Figura 119: Subconjunto SA-1-105.*

Además de repetir los mismos pasos para el cuerpo inferior, es necesario también, una vez se tiene este último ensamblado, establecer la condición de paralelismo entre los ejes de ambos conectores, de modo que ambos queden alineados y puedan enfrentarse correctamente con los casquillos de la caldera.

## 5.6 SA-1-106

Este *Sub-Assembly* detalla el ensamblado de las válvulas de seguridad y silbato que, como pudo verse durante el modelado de piezas, comparten cuerpo y flujo de vapor.

En primer lugar, se utiliza *Coincidence Constraint* y *Contact Constraint* para posicionar la válvula del silbato. A continuación, y usando los mismos comandos, se posicionan la base del silbato y la campana. Estableciendo paralelismo entre la cara plana de la base del silbato y cualquiera de las caras laterales del cuerpo de la válvula se consigue dirigir el chorro de vapor hacia el interior de la campana.



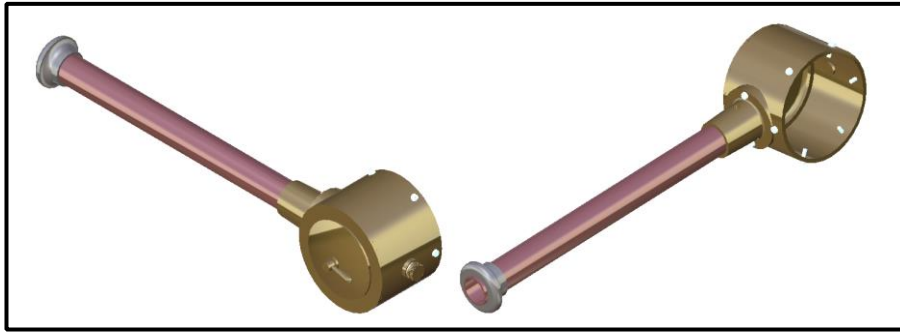
**Figura 120: Subconjunto SA-1-106.**

Para el posicionamiento de la bola y el muelle de la válvula de seguridad, se utilizan *Coincidence Constraint* y *Offset Constraint* para definir las coincidencias y distancias entre planos de las piezas, así como con planos de la base. Por último, se posiciona el tensor de la válvula de seguridad haciendo coincidir su eje y su cara superior con los del cuerpo de la válvula.

Para finalizar el subconjunto, se hace atravesar la manivela de válvula de silbato por el cuerpo de la válvula, fijándola en el extremo contrario con su correspondiente arandela y tuerca.

## 5.7 SA-1-107

Este *Sub-Assembly* contiene el colector de escape y la chimenea, directamente conectados entre sí. En primer lugar, se posiciona la base de la chimenea sobre el colector de escape estableciendo el contacto entre las superficies circulares y alineando los ejes de la chimenea y los ejes de los taladros. A continuación, se posicionan los dos tornillos M3x14 que fijan la base al colector, para seguidamente colocar el tubo de la chimenea alineando su eje y forzando el contacto de su cara plana inferior con la superficie de apoyo en la base. Para colocar el sombrero de la chimenea, se alinea su eje y se fija su posición mediante *Offset Constraint* con respecto al plano horizontal del tubo de la chimenea.



**Figura 121: Subconjunto SA-1-107.**

Una vez posicionada la chimenea, se procede a colocar el tapón de drenaje. Para ello, se alinean en primer lugar los ejes del tapón, junta y el correspondiente taladro en la parte inferior del colector. Hecho esto, se fuerzan los contactos entre superficie exterior del colector, caras de la junta y cara inferior de la cabeza del tapón.

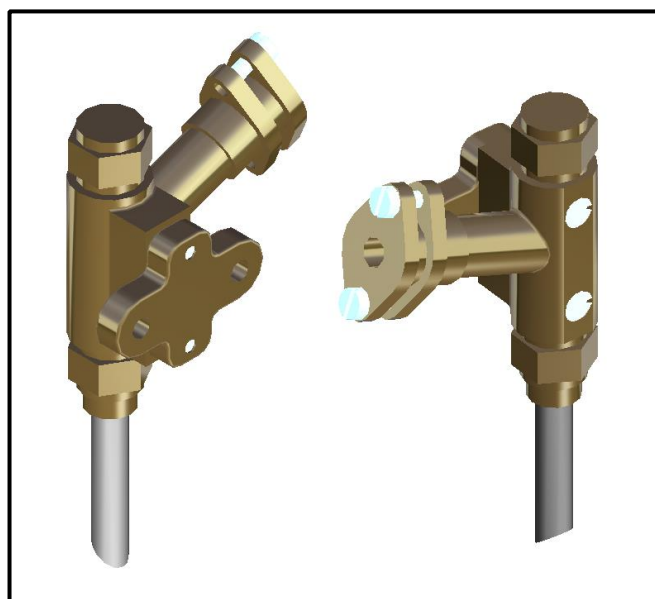
También dentro de este subconjunto se posicionan los 6 tornillos de cabeza plana M3x8 que fijarán el colector al cuerpo de la caldera. Para ello, basta con alinear sus ejes con los de los taladros que presenta el colector y forzar el contacto entre el asiento del tornillo y la superficie exterior del colector.

Por último, se posiciona el tirador de la puerta alineando su eje con el del correspondiente taladro y estableciendo un *Offset Constraint* entre su cara plana de apoyo y un plano vertical del colector.

## 5.8 SA-1-108

Este *Sub-Assembly* ensambla la bomba de agua dummy, incorporada anteriormente en SA-1-104. El ensamblado comienza con la unión del cuerpo y la placa de montaje, que se realiza forzando el contacto entre superficies y alineando los ejes de los 2 taladros dispuestos verticalmente en ambas piezas. Una vez posicionadas, se pueden colocar los dos tornillos avellanados M3x24 para fijarlas, quedando la cabeza plana de los tornillos enrasada en la cara plana del cuerpo de la bomba.

También se posicionan los dos tornillos de cabeza plana M3x8 que unen las dos pletinas del cilindro de la bomba. Por último, se alinea el eje del trozo de manguera con el de su respectivo conector.



**Figura 122: Subconjunto SA-1-108.**



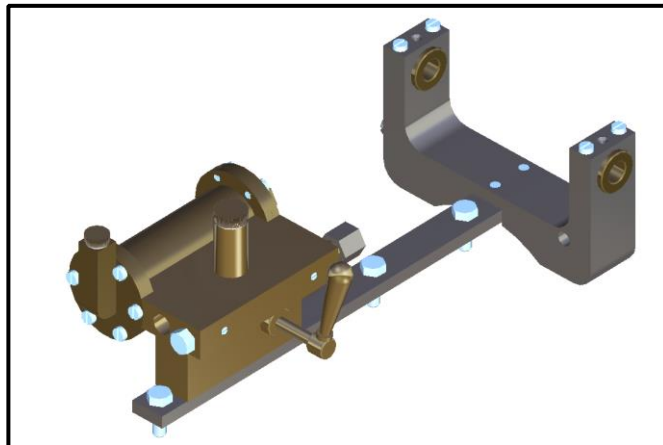
## 5.9 SA-1-109

Este *Sub-Assembly* se encarga del montaje de los soportes del motor y del cigüeñal, así como de las partes inmóviles del motor.

En primer lugar, se unen los soportes del motor y del cigüeñal y se colocan, desde la cara inferior del soporte motor, los dos tornillos avellanados M4x10 que los fijan. También se colocan los 3 tornillos de cabeza hexagonal M5x14 encargados de fijar el soporte motor a sus correspondientes casquillos de la caldera.

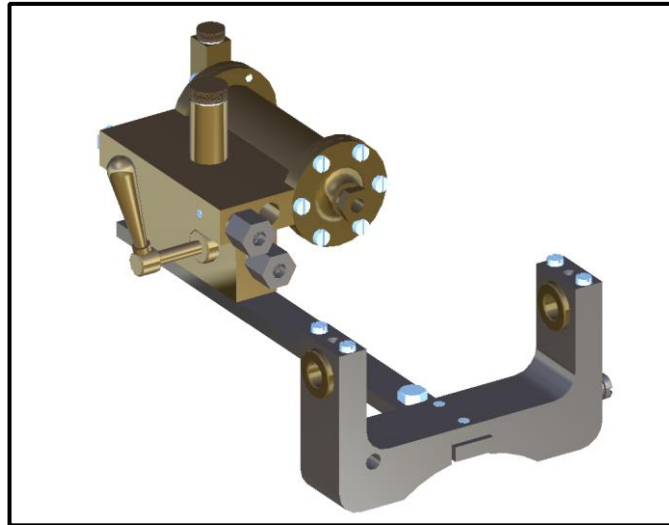
Para continuar con el soporte del cigüeñal, se colocan en primer lugar las abrazaderas del eje, y se fijan mediante los tornillos de cabeza plana M3x18. Seguidamente, se colocan los casquillos de bronce alineando sus ejes con los de los alojamientos del soporte y el contacto entre superficies planas. En este punto no se puede olvidar, al ser crítico para el funcionamiento de la máquina y para su vida operacional, alinear los ejes de los conductos de lubricación de los casquillos con los de las abrazaderas del soporte. Por último, se posiciona sobre el lateral del soporte el tornillo de fijación de la rueda dentada de la bomba de agua.

Seguidamente, se posiciona sobre el soporte motor el bloque inferior de la válvula de alimentación, que queda fijado mediante dos tornillos avellanados M4x10 insertados desde la cara inferior del soporte. Hecho esto, se hace pasar la manivela reguladora de flujo de vapor por el bloque, fijándola en el otro extremo mediante su correspondiente arandela y tuerca.



**Figura 123: Subconjunto SA-1-109.**

Una vez colocado el bloque inferior, se procede a situar el cuerpo de la válvula de alimentación sobre él. Además, se coloca el depósito de aceite encargado de lubricar el pistón en su movimiento dentro del conducto. Este depósito incluye además su correspondiente tapón y junta de goma. Para finalizar el equipado del cuerpo de la válvula, se coloca el tornillo de cabeza hexagonal M5x8 que tapona uno de los extremos del conducto de escape de la válvula, y se colocan también las correspondientes tuercas de apriete y juntas en las tomas de alimentación y escape de vapor de la válvula.



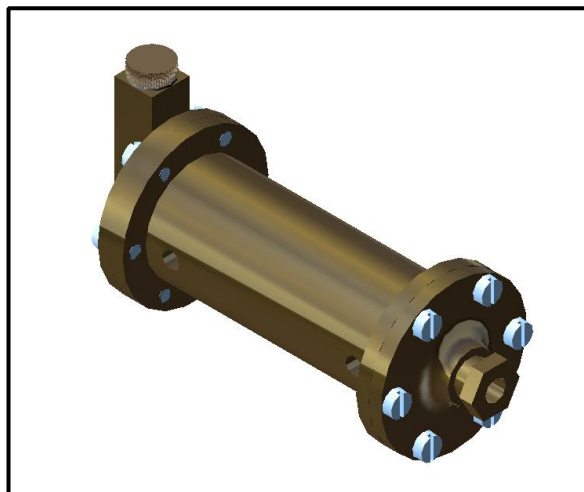
*Figura 124: Subconjunto SA-1-109, vista alternativa.*

Por último, se acopla el subconjunto del cilindro (SA-1-110, detallado en el siguiente punto) al cuerpo de la válvula. Para ello, no hay más que alinear los conductos de comunicación entre válvula y cilindro y forzar el contacto entre ambas superficies cilíndricas.

### 5.10 SA-1-110

Este *Sub-Assembly* engloba el cilindro. Su ensamblaje es bastante sencillo, basta con posicionar las tapas contra el cuerpo del cilindro alineando dos de sus taladros y forzando el contacto superficial para, seguidamente, colocar los 6 tornillos (por cada tapa) M3x6 encargados de asegurar la unión.

Una vez colocadas las tapas, se monta el tapón de la tapa frontal con su correspondiente junta, así como el casquillo adaptador de la tapa posterior.



*Figura 125: Subconjunto SA-1-110.*

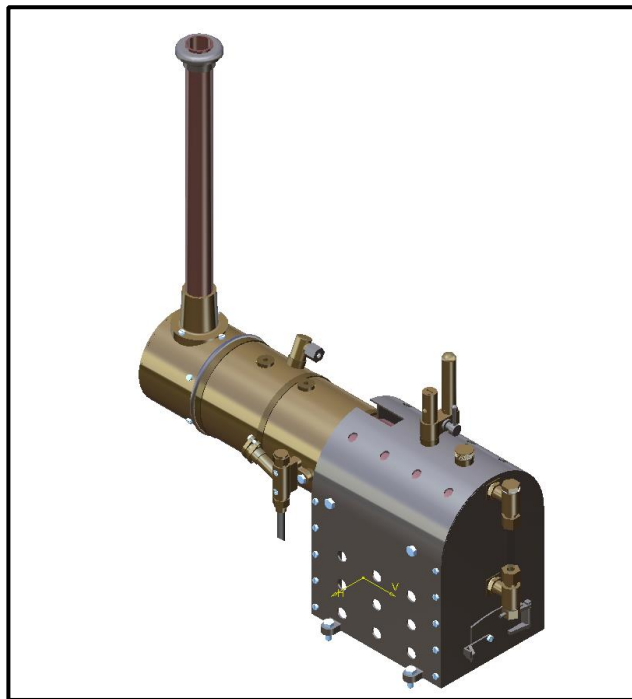
### 5.11 SA-1-114

Este *Sub-Assembly* integra cámara de combustión, caldera, colector de escape, chimenea, válvulas de seguridad y silbato, e indicador de nivel de agua.

Partiendo del subconjunto SA-1-103, se añade el conjunto caldera SA-1-104, cuya posición se fija haciendo coincidir el eje de la caldera con el de la apertura correspondiente de la tapa frontal de la cámara de combustión, así como alineando el eje del tapón de relleno de agua con su correspondiente apertura en la cubierta superior de la cámara.

A continuación, se introduce el subconjunto SA-1-107, que se posiciona alineando el eje del colector con el de la caldera, y alineando dos de los 6 tornillos con sus correspondientes taladros en la caldera.

Hecho esto, se posiciona el subconjunto SA-1-106 sobre su correspondiente casquillo de la caldera. Para ello, se alinea el eje del casquillo con el de la válvula de seguridad, y se fuerza el contacto superficial entre las correspondientes caras. Para finalizar el posicionamiento, se fija mediante *Angle Constraint* el paralelismo entre una de las caras laterales del cuerpo de la válvula y la tapa frontal de la cámara de combustión.



**Figura 126: Subconjunto SA-1-114.**

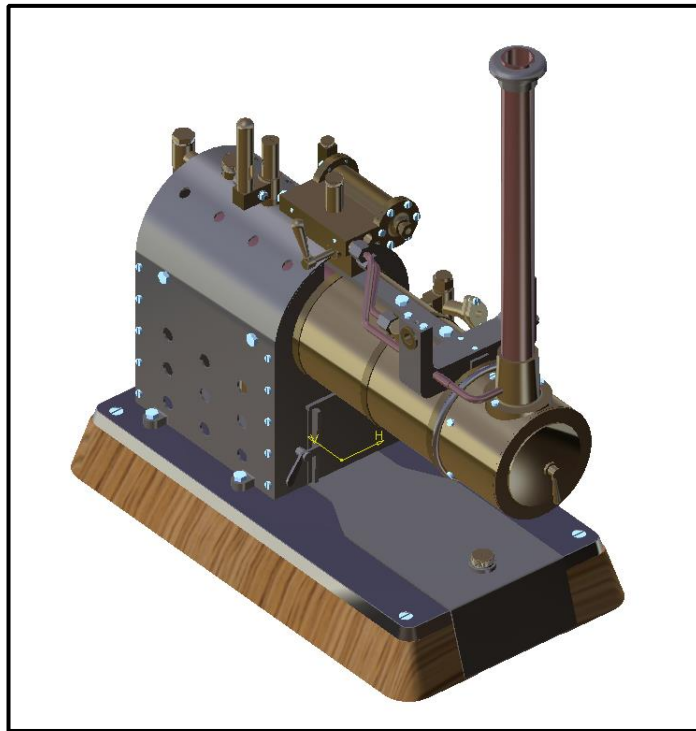
Por último, se introduce el indicador de nivel, subconjunto SA-1-105, que queda posicionado sin más que alinear el eje de uno de sus conectores con su correspondiente conducto y forzar el contacto superficial con la correspondiente cara del casquillo.

## 5.12 SA-1-115

Este *Sub-Assembly* añade al subconjunto anterior la base portante y depósito de combustible, así como los elementos inmóviles del motor.

En primer lugar, se ensambla la placa de aluminio a la base de madera, y se atornilla con los 4 tornillos avellanados M5x30. Seguidamente se posiciona el conjunto SA-1-101 forzando el contacto entre la tapa del depósito y la base (tanto en la chapa horizontal como en la angular).

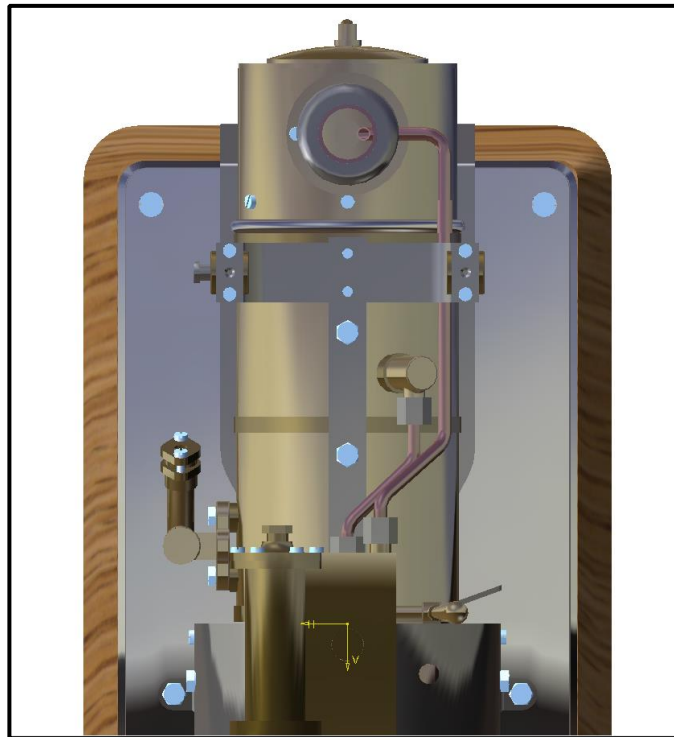
Teniendo ya la base portante, se introduce el subconjunto SA-1-114, forzándose el contacto entre la cara inferior de la cámara de combustión y la cara superior de la placa de aluminio. Una vez hecho esto, no queda más que alinear los ejes de dos de los 4 tornillos hexagonales de unión (deben elegirse dos diagonalmente opuestos).



**Figura 127: Subconjunto SA-1-115.**

Por último, se procede al ensamblado de las piezas inmóviles del motor. Para ello, se empieza por posicionar el subconjunto SA-1-109 sobre la caldera, paso que se logra alineando los 3 tornillos de cabeza hexagonal del soporte motor con sus respectivos casquillos dispuestos en la caldera. Además, se fuerza el contacto superficial entre la cara inferior del soporte motor y la cara superior de uno de los casquillos.

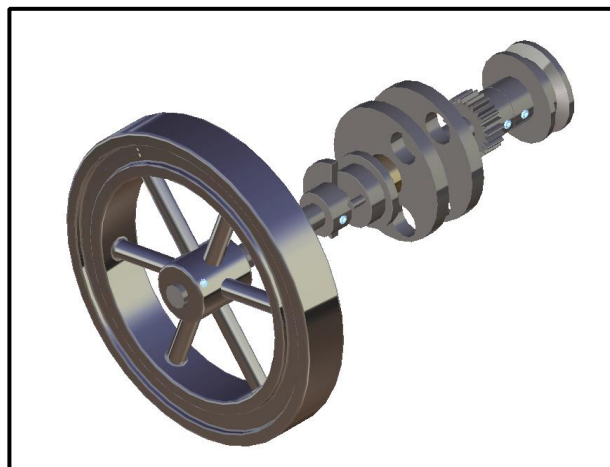
Una vez hecho esto, queda únicamente posicionar las tuberías de suministro y escape de vapor. Para la primera, basta con añadir la tubería de alimentación y alinear sus ejes en los extremos planos con los de las tuercas de apriete del conector codo de la caldera y de la toma de alimentación del bloque inferior de la válvula, respectivamente. Tras esto, basta con forzar el contacto superficial entre las caras planas externas de la tubería y la junta de estanqueidad correspondiente que se encuentra dentro de la tuerca. Para la tubería de escape, dividida en dos tramos, se sigue un proceso análogo. El primer tramo se posiciona entre la tuerca de la toma de escape de la válvula y el taladro correspondiente en el soporte del cigüeñal. El segundo tramo se enfrenta al final del primer tramo, mientras que su otro extremo se alinea con el taladro correspondiente en la base de la chimenea. En la siguiente figura se puede observar el detalle del conexionado de ambas tuberías.



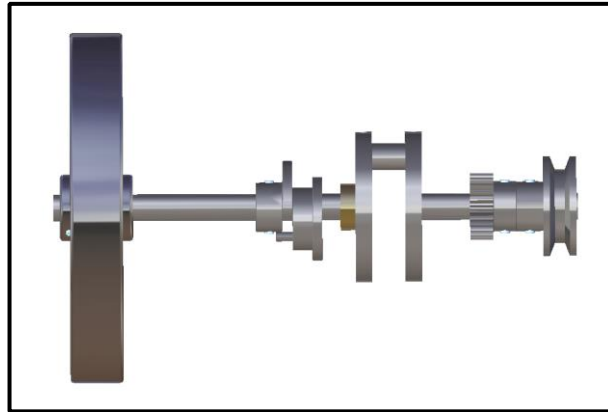
*Figura 128: Subconjunto SA-1-115, detalle del conexionado de las tuberías.*

### 5.13 SA-2-201

Este *Sub-Assembly* engloba todas las piezas del cigüeñal. El ensamblado no resulta complejo, y se realiza mediante coincidencias de ejes (*Coincidence Constraint*), contactos superficiales (*Contact Constraint*), y estableciendo distancias entre superficies planas (*Offset Constraint*). Es importante recalcar en este punto la importancia de montar los tornillos sin cabeza M3x4 (M3x6 en el caso de la rueda) encargados de fijar al eje del cigüeñal aquellas piezas destinadas a girar solidariamente con él (polea, rueda dentada de 24 dientes, disco de arrastre de la excéntrica y rueda).



*Figura 129 : Subconjunto SA-2-201.*



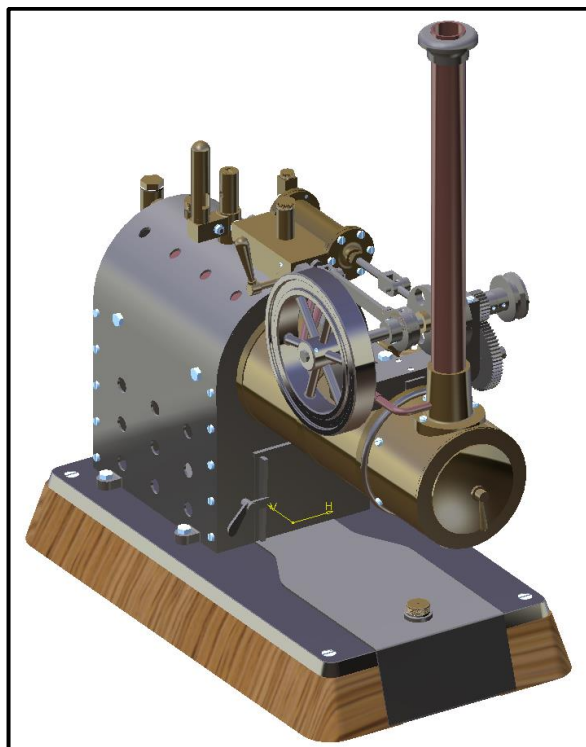
*Figura 130 : Subconjunto SA-2-201, vista cenital.*

## 5.14 SA-2-205

Este *Sub-Assembly* (llamado así únicamente por mantener la nomenclatura original de los planos) engloba el conjunto final de la máquina de vapor completa. Para ello, une los subconjuntos SA-1-115, SA-2-201 y los 3 mecanismos de pistón presentes en la máquina (pistón del cilindro, pistón de la válvula y pistón de la bomba de agua dummy).

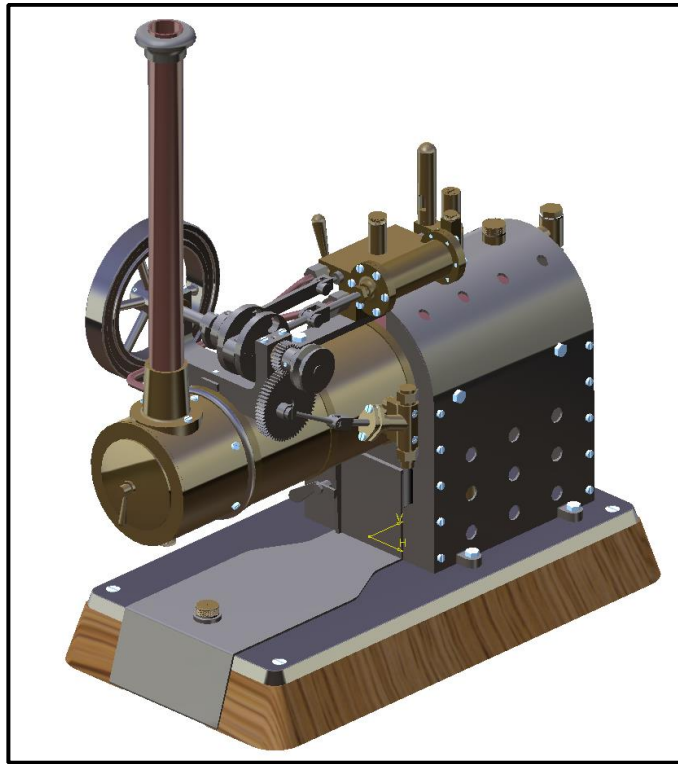
Para el montaje de los 3 pistones y sus respectivas horquillas se procede de igual manera. En primer lugar, se alinea el eje del pistón con el de su alojamiento. A continuación, se ensambla la horquilla (en el caso de la válvula de pistón, introduciendo un offset constraint para respetar las cotas indicadas en los planos) y su correspondiente pasador de bloqueo.

En el caso del pistón de la bomba de agua, se ensambla la biela (con sus casquillos en ambos extremos) al pasador de la horquilla y a la cogida de la rueda dentada de 60 dientes.



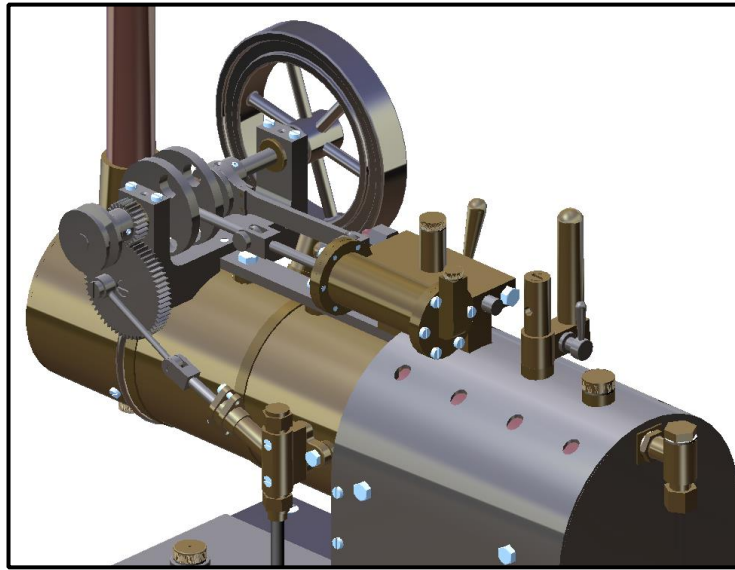
*Figura 131: Subconjunto SA-2-205.*

Para el caso del pistón del cilindro, se ensambla en primer lugar la biela con su cabeza del extremo del cigüeñal y sus casquillos. A la hora de unirla al cigüeñal y a la horquilla del pistón, es importante tener en cuenta su orientación, de modo que los taladros de lubricación de los casquillos queden mirando hacia arriba (si quedan mirando hacia abajo sería imposible mantener las superficies de unión lubricadas y se produciría un desgaste prematuro).



**Figura 132: Subconjunto SA-2-205.**

La biela de la válvula cilíndrica se ensambla de la misma manera que la del pistón, con la salvedad de que la cabeza que agarra al disco excéntrico se une al brazo de la biela mediante unos pasadores soldados, en lugar de mediante rosca. De nuevo hay que recalcar la importancia de orientar la biela de modo que los taladros de lubricación queden mirando hacia arriba.



*Figura 133: Subconjunto SA-2-205, detalle ampliado de las partes móviles del motor.*

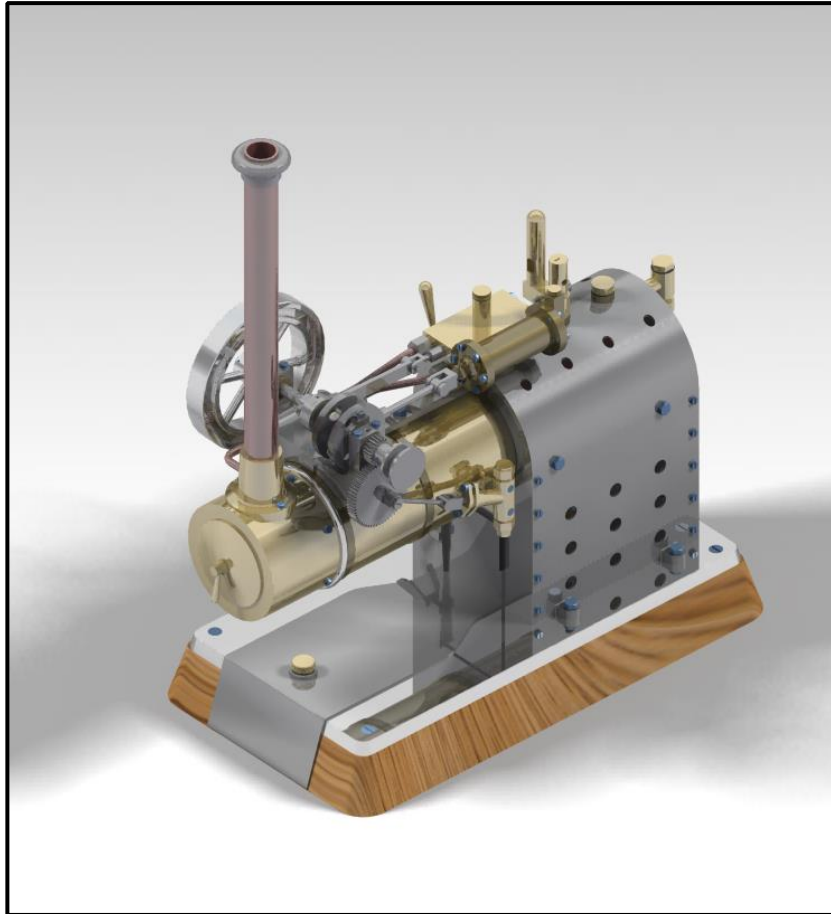
## 5.15 Renderizado

Una vez obtenido el modelo final de la máquina de vapor, se obtendrán una serie de imágenes fotorrealistas del modelo, que representen fielmente las características físicas de cada uno de los materiales empleados en el modelado. Esto se conseguirá haciendo un renderizado con la propia herramienta de la que dispone CATIA V5.

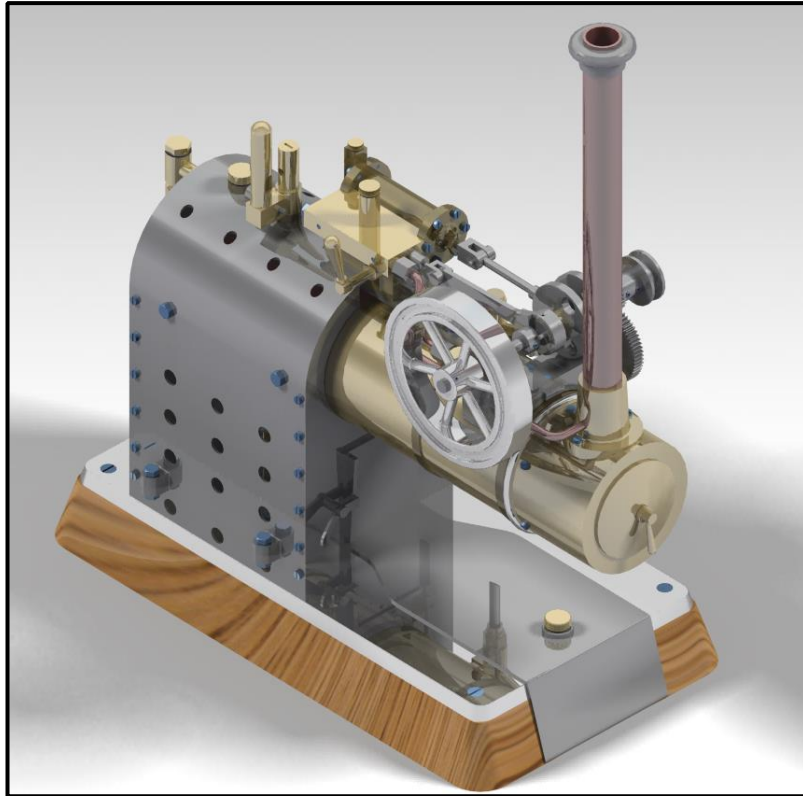
Esta herramienta se encuentra dentro del módulo *Assembly Design*, bajo el comando *Photo Studio Easy Tools*. Una vez ejecutado el comando, se abre un pequeño menú en el que se puede configurar el renderizado (puntos de luz, sombreados, fondos, calidad, etc.). Es importante en este punto probar diferentes configuraciones de puntos de luz y sombreados, ya que al utilizarse gran cantidad de materiales metálicos pueden aparecer muchos reflejos que dificulten la correcta visualización del modelo.

A continuación, se muestran varias imágenes del modelo renderizado:

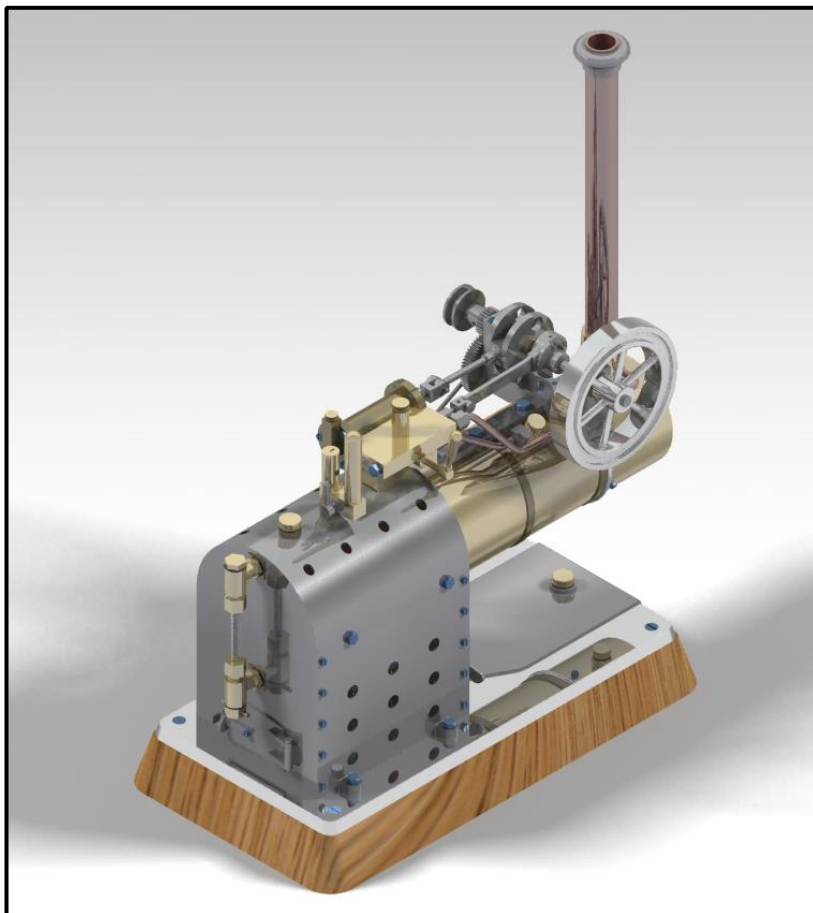




*Figura 134: Imagen renderizada en perspectiva 1.*



*Figura 135 : Imagen renderizada en perspectiva 2.*



*Figura 136 : Imagen renderizada en perspectiva 3.*

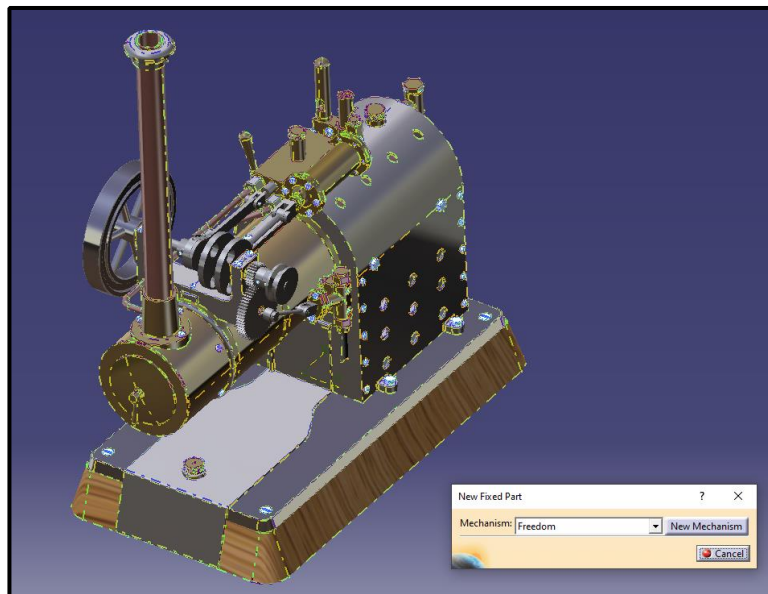




## 6 ANIMACIÓN

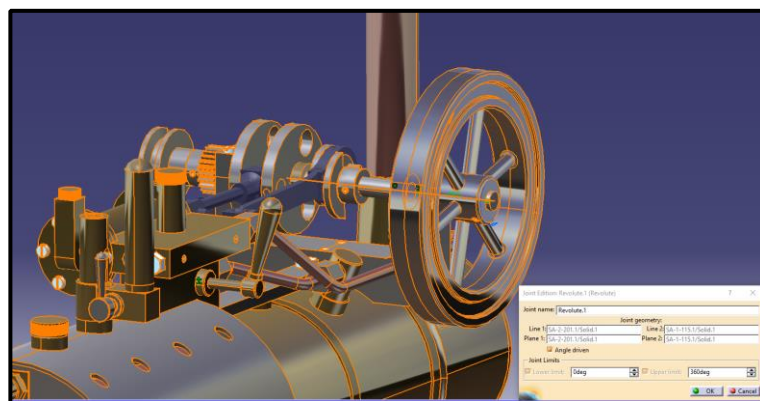
Tras obtener el modelo completo de la máquina de vapor, se procederá en este capítulo a hacer una simulación cinemática del mismo. Para ello, se utilizará el módulo *DMU Kinematics*.

Para comenzar, se crea el mecanismo, que se denominará *Freedom*, y se impone la condición de *Fixed Part* sobre el subconjunto SA-1-115. Este paso permite inmovilizar todos los componentes que no desarrollarán movimiento bajo la acción del vapor.



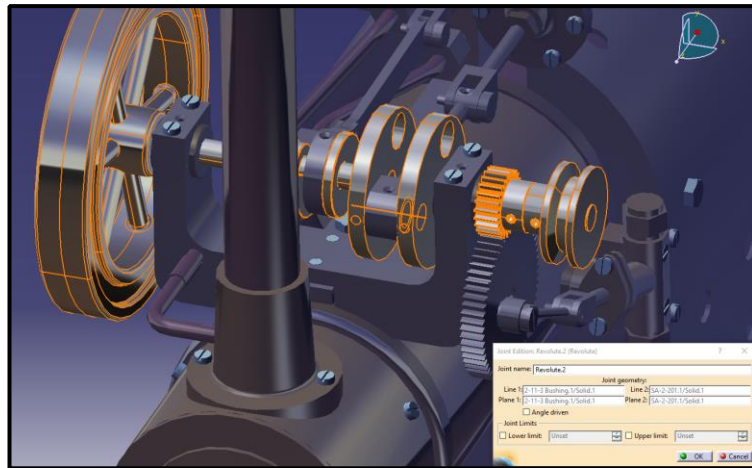
**Figura 137:** Creación del mecanismo *Freedom* y fijación del subconjunto SA-1-115.

A continuación, se impone una unión de tipo *Revolute Joint* entre el eje del cigüeñal y el eje de uno de los rodamientos sobre los que se soporta. Dentro de la ventana del comando, se marca la casilla *Angle Driven* para definir este giro como el grado de libertad de nuestro sistema y se define el rango permisible del giro, que será de 0° a 360°.



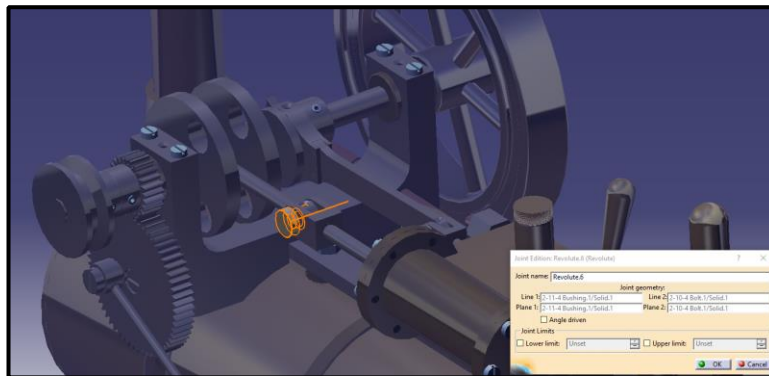
**Figura 138:** *Revolute Joint* entre el cigüeñal y sus rodamientos.

Una vez definido el giro del cigüeñal, se establecen las uniones entre el cigüeñal y el pistón motor, a través de su correspondiente biela de transmisión. Para ello, se define en primer lugar un *Revolute Joint* entre el rodamiento de la cabeza de la biela y el pin de la excéntrica del cigüeñal. En este caso, no se marca la opción *Angle Driven*, ya que el ángulo de giro del rodamiento sobre el pin dependerá en todo momento del giro del eje del cigüeñal.



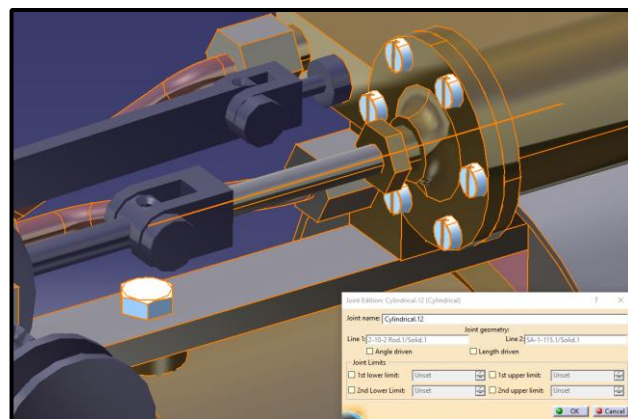
**Figura 139: Revolute Joint entre la cabeza de la biela y el pin de la excéntrica.**

A continuación, se definen los *Rigid Joints* entre el rodamiento y la cabeza de la biela, entre la cabeza de la biela y la barra y entre la barra y el rodamiento del extremo opuesto. De nuevo se establece un *Revolute Joint* entre el rodamiento del extremo opuesto y el pasador de la barra del pistón (pieza 2-10/4).



**Figura 140: Revolute Joint entre rodamiento y pasador.**

Posteriormente, se definen los *Rigid Joints* entre el pistón, sus O-rings, la barra de unión, la cabeza de anclaje y el pasador. Por último, se impone un *Cylindrical Joint* entre la barra del pistón y su alojamiento en el cilindro. De nuevo, no se marca *Angle Driven* ni *Length Driven*, puesto que la translación del pistón dentro del cilindro dependerá en todo momento del giro del cigüeñal.

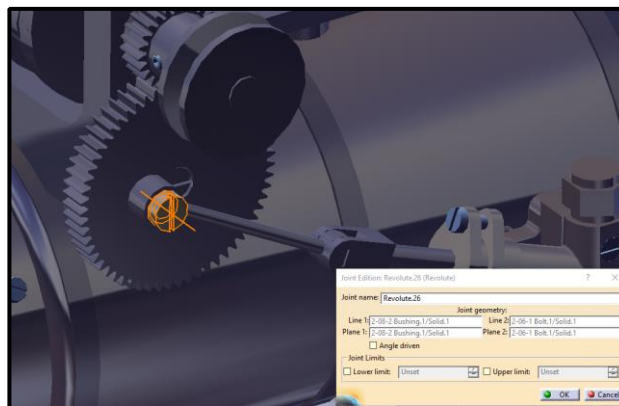


**Figura 141: Cylindrical Joint entre pistón y cilindro.**

De forma completamente análoga se imponen los giros y las uniones rígidas entre la excéntrica del cigüeñal y la válvula cilíndrica, a través de su correspondiente biela.

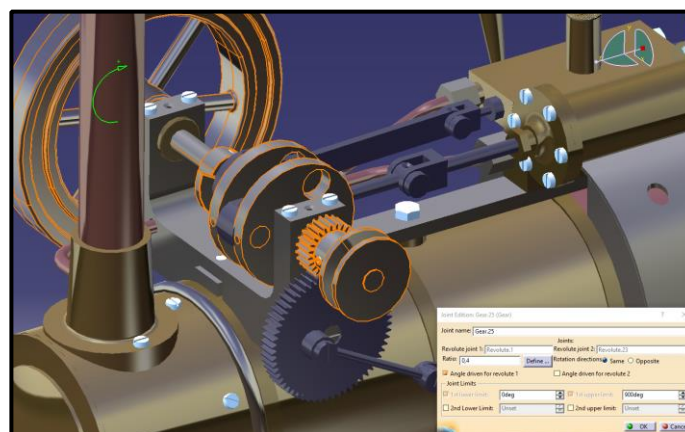
Tras definir los movimientos de los pistones, queda por definir únicamente el mecanismo de la bomba de alimentación. En primer lugar, se define un *Revolute Joint* entre el rodamiento de la rueda dentada de 60 dientes

y el eje del bulón que la sostiene, para posteriormente unir rígidamente la rueda dentada al rodamiento.



**Figura 142: Revolute Joint entre rodamiento y bulón.**

Una vez definido este giro, se utiliza el comando *Gear Joint* para engranar las dos ruedas: el primer giro será el del cigüeñal, mientras que el segundo será el del rodamiento de la rueda de 60 dientes. Se introduce como *Ratio* la relación entre ambas ruedas ( $24/60=0.4$ ) y se marca la casilla *Angle driven for Revolute 1*. En este punto, se puede volver a definir el rango de giro del comando *Revolute 1*, que se estableció previamente entre 0 y 360°. Sin embargo, de cara a obtener una simulación que muestre el movimiento de todas las articulaciones en su rango de movimiento completo, modificamos el rango entre 0° y 900°. Este nuevo rango tiene en cuenta la relación del engranaje, y permitirá visualizar una vuelta completa de la rueda dentada de 60 dientes durante la simulación.



**Figura 143: Gear Joint entre ruedas dentadas.**

Para finalizar, solo queda articular la biela de la bomba y el movimiento cilíndrico del ariete. Para ello se sigue un procedimiento idéntico al detallado para el pistón motor.

Finalizado este proceso, aparece el mensaje de que el mecanismo puede ser simulado. Se procede entonces a realizar la simulación, en la que el eje del cigüeñal girará de 0° a 900° y la rueda dentada de 60 dientes girará de 0° a 360°. Una vez creada la simulación, se compila mediante el comando *Compile Simulation*, marcando la casilla *Generate a replay*, y se reproduce con *Simulation Player* desde el propio módulo DMU Kinematics.

Por último, se realiza una segunda compilación, esta vez marcando la casilla *Generate an animation file* y generando así un archivo de vídeo en formato .avi que se adjunta a la memoria.





# 7 CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

---

**E**n este último capítulo se expondrán las conclusiones obtenidas tras la realización del trabajo fin de grado. Además, se expondrán brevemente posibles desarrollos futuros que se podrían llevar a cabo tomando este modelado como punto de partida.

## 7.1 Conclusiones

En primer lugar, se ha obtenido una visión detallada de los orígenes y evolución de la máquina de vapor, de vital importancia en la primera revolución industrial y muchas veces olvidada hoy en día tras la aparición de nuevas tecnologías. Esta revisión histórica ha permitido al alumno obtener valiosos conocimientos ingenieriles que fundamentan muchos de los desarrollos tecnológicos de los que hace uso actualmente.

El desarrollo de la parte principal del proyecto, que embarca tanto el modelado de las diferentes piezas como el ensamblado y animación del conjunto, ha permitido al alumno desarrollar, profundizar e incluso ampliar los conocimientos previamente adquiridos en materia de diseño asistido por ordenador durante sus estudios de grado. Además, al trabajar con un elevado número de piezas, subconjuntos y normales, se ha podido simular una metodología y entorno de trabajo semejante al de una oficina de diseño en el ámbito industrial, hecho que sin duda supondrá un gran beneficio para el futuro profesional del alumno.

## 7.2 Desarrollos futuros

En cuanto a los posibles desarrollos futuros, se proponen tres opciones para ampliar el alcance de este proyecto:

- Definición de los diferentes procesos de fabricación de cada una de las piezas con vistas a su posterior fabricación para ensamblar el modelo físico a escala. Para ello, y dado que muchas de las piezas se pueden mecanizar, se propone utilizar el módulo *Machining* de CATIA.
- Utilizar un software de impresión 3D para generar y ensamblar el modelo a escala en resina.
- Mejora y optimización del modelo, mediante la modificación de parámetros o el diseño de la válvula, cilindro y engranajes para obtener mayores eficiencias.



## 8 BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] «Model Engineering Website: Horizontal Steam Plant “The Freedom”». [En línea] Disponible en: [https://modelengineeringwebsite.com/The\\_Freedom\\_steam\\_plant.html](https://modelengineeringwebsite.com/The_Freedom_steam_plant.html). [Accedido: 08-11-2021]
- [2] «Wikipedia: Máquina de Vapor». [En línea] Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A1quina\\_de\\_vapor](https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A1quina_de_vapor) . [Accedido: 20-11-2021]
- [3] «Cómo funciona una máquina de vapor». [En línea] Disponible en: <https://como-funciona.co/una-maquina-de-vapor/>. [Accedido: 20-11-2021]
- [4] «History of steam power - The steam engine timeline». [En línea] Disponible en: <https://ungo.com.tr/en/2020/02/history-of-steam-power-the-steam-engine-timeline/>. [Accedido: 02-01-2022]
- [5] «A History of Steam Power». [En línea] Disponible en: [https://folk.ntnu.no/haugwarb/TKP4175/History/history\\_of\\_steam\\_power.pdf](https://folk.ntnu.no/haugwarb/TKP4175/History/history_of_steam_power.pdf). [Accedido: 02-01-2022]
- [6] «La eolípila, primera máquina de vapor de la Historia». [En línea] Disponible en: [https://www.naturgy.com/la\\_eolipila\\_primera\\_maquina\\_de\\_vapor\\_de\\_la\\_historia](https://www.naturgy.com/la_eolipila_primera_maquina_de_vapor_de_la_historia) . [Accedido: 02-01-2022]
- [7] «Wikipedia: Eolípila». [En línea] Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Eol%C3%ADpila>. [Accedido: 02-01-2022]
- [8] B.J.G. van der Kooij. The invention of the Steam Engine. University of Technology Delft, 2015.
- [9] Robert H. Thurston, A.M., C.E. A History of the Growth of the Steam-Engine. D. Appleton and Company, 1878.
- [10] «Wikipedia: Thomas Newcomen». [En línea] Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Thomas\\_Newcomen](https://es.wikipedia.org/wiki/Thomas_Newcomen) . [Accedido: 14-01-2022]
- [11] «Wikipedia: Máquina de vapor de Watt». [En línea] Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A1quina\\_de\\_vapor\\_de\\_Watt](https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A1quina_de_vapor_de_Watt). [Accedido: 14-01-2022]
- [12] «Wikipedia: Richard Trevithick». [En línea] Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Richard\\_Trevithick](https://es.wikipedia.org/wiki/Richard_Trevithick). [Accedido: 19-01-2022]
- [13] «The Slide Valve». [En línea] Disponible en: <https://web.archive.org/web/20070426233407/http://oldenginehouse.users.btopenworld.com/slide.htm> . [Accedido: 05-12-2021]
- [14] «Wikipedia: Piston valve (steam engine)». [En línea] Disponible en: [https://en.wikipedia.org/wiki/Piston\\_valve\\_\(steam\\_engine\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Piston_valve_(steam_engine)). [Accedido: 05-12-2021]
- [15] «Wikipedia: Corliss steam engine». [En línea] Disponible en:

- [https://en.wikipedia.org/wiki/Corliss\\_steam\\_engine#Corliss\\_valves](https://en.wikipedia.org/wiki/Corliss_steam_engine#Corliss_valves). [Accedido: 27-01-2022]
- [16] «Wikipedia: Portable engine». [En línea] Disponible en: [https://en.wikipedia.org/wiki/Portable\\_engine#History](https://en.wikipedia.org/wiki/Portable_engine#History). [Accedido: 04-05-2022]
- [17] «Steam Scenes: About Portable Engines». [En línea] Disponible en : <https://www.steamscenes.org.uk/engines/types/portable-engine/about/> [Accedido: 04-05-2022]
- [18] «Paxman History Pages». [En línea] Disponible en: <https://www.paxmanhistory.org.uk/cat-700A.htm>. [Accedido: 11-05-2022]
- [19] «Máquina de vapor perforadora victoriana, del siglo XIX - Ilustración de stock». [En línea] Disponible en: <https://www.istockphoto.com/es/vector/m%C3%A1quina-de-vapor-perforadora-victoriana-del-siglo-xix-gm1177038153-328424511> [Accedido: 20-05-2022]
- [20] «Tuxford portable steam engine». [En línea] Disponible en: <https://www.nms.ac.uk/explore-our-collections/stories/science-and-technology/tuxford-portable-steam-engine/#:~:text=Tuxford%20portable%20steam%20engines,the%20confines%20of%20the%20armyard.> [Accedido: 11-05-2022].
- [21] «Engines Built by Tuxford». [En línea] Disponible en: <https://www.steamscenes.org.uk/engines/tuxford/icons/type,14%7C/checkboxes/>. [Accedido: 11-05-2022]
- [22] «Wikipedia: CATIA». [En línea] Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/CATIA>. [Accedido: 03-02-2022]
- [23] «Part Design Fundamentals». [En línea] Disponible en: [http://cadcam.gwnu.ac.kr/subject/catia/PDG/CATIA\\_Material\\_PDG\\_02.pdf](http://cadcam.gwnu.ac.kr/subject/catia/PDG/CATIA_Material_PDG_02.pdf). [Accedido: 03-02-2022]
- [24] «Wireframe and Surface in a Nutshell». [En línea] Disponible en: [http://catiadoc.free.fr/online/CATIAfr\\_C2/wfsugCATIAfrs.htm#:~:text=The%20Wireframe%20and%20Surface%20workbench%20allows%20you%20to%20create%20wireframe,of%20solids%2Dbased%20hybrid%20modeling.](http://catiadoc.free.fr/online/CATIAfr_C2/wfsugCATIAfrs.htm#:~:text=The%20Wireframe%20and%20Surface%20workbench%20allows%20you%20to%20create%20wireframe,of%20solids%2Dbased%20hybrid%20modeling.) [Accedido: 05-02-2022]
- [25] «Chapter 11: Assembly Modeling». [En línea] Disponible en: [http://catiadoc.free.fr/pdf/EN-Catia\\_v5r13\\_Designer\\_Guide\\_Chapter11-Assembly\\_Modeling.pdf](http://catiadoc.free.fr/pdf/EN-Catia_v5r13_Designer_Guide_Chapter11-Assembly_Modeling.pdf). [Accedido: 05-02-2022]
- [26] «DMU Kinematics Simulator in a Nutshell». [En línea] Disponible en: [http://catiadoc.free.fr/online/CATIAfr\\_C2/kinugCATIAfrs.htm](http://catiadoc.free.fr/online/CATIAfr_C2/kinugCATIAfrs.htm). [Accedido: 05-02-2022]
- [27] M. G. del Río Cidoncha, M. E. Martínez Lomas, J. Martínez Palacios, y S. Pérez Díaz. El libro de Catia V5: Módulos Part Design, Wireframe & Surface Design, Assembly Design y Drafting. Tébar Flores, 2007
- [28] «SOLIDWORKS. Qué es y para qué sirve». [En línea] Disponible en: <https://solid-bi.es/solidworks/>. [Accedido: 21-02-2022]
- [29] «Wikipedia: SolidWorks». [En línea] Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/SolidWorks>. [Accedido: 21-02-2022]
- [30] «Diferencias en el Software CATIA V5 y SOLIDWORKS». [En línea] Disponible en: <https://mastercad.com.es/blog/f/diferencias-en-el-software-catia-v5-y-solidworks>. [Accedido: 21-02-2022]

- [31] «Dassault Systemes. Página oficial SolidWorks». [En línea] Disponible en: <https://www.solidworks.com/>. [Accedido: 24-02-2022]
- [32] «Wikipedia: NX Unigraphics». [En línea] Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/NX\\_\(Unigraphics\)](https://es.wikipedia.org/wiki/NX_(Unigraphics)). [Accedido: 24-02-2022]
- [33] «CATIA vs NX. Tú eliges.». [En línea] Disponible en: <https://www.workexperienceexpert.es/catia-vs-nx-tu-eliges>. [Accedido: 24-02-2022]
- [34] «Página oficial Siemens NX». [En línea] Disponible en: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/products/nx/>. [Accedido: 24-02-2022]
- [35] «Página oficial PTC Creo». [En línea] Disponible en: <https://www.ptc.com/es/products/creo> [Accedido: 27-02-2022]
- [36] «Wikipedia: Creo Elements/Pro». [En línea] Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Creo\\_Elements/Pro#:~:text=Creo%20Elements%2FPro%2C%20antes%20conocido,un%20software%20de%20dise%C3%B1o%20param%C3%A9trico](https://es.wikipedia.org/wiki/Creo_Elements/Pro#:~:text=Creo%20Elements%2FPro%2C%20antes%20conocido,un%20software%20de%20dise%C3%B1o%20param%C3%A9trico). [Accedido: 27-02-2022]
- [37] «PTC and Volvo Group Announce Digital Engineering Collaboration». [En línea] Disponible en: <https://www.ptc.com/en/news/2021/ptc-volvo-group-announce-digital-engineering-collaboration>. [Accedido: 27-02-2022]
- [38] «Providing PLM to Aerospace and Defense». [En línea] Disponible en: <https://www.ptc.com/en/blogs/plm/providing-plm-to-aerospace-and-defense> [Accedido: 27-02-2022]

