



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación

Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación

PROYECTO/TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Análisis tecnológico, modelado digital y diseño museológico
de la evolución de las máquinas de vapor.**

Máster en Ingeniería Industrial

Autor: Francisco Jesús Porrás Robles

Tutor: Lorenzo Sevilla Hurtado

Cotutor: Francisco Javier Trujillo Vilches

MÁLAGA, Mayo de 2025



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Lorenzo Sevilla Hurtado, por su dedicada tutorización del proyecto, así como por sus valiosos conocimientos en la materia tratada en este trabajo.

Al Dr. Francisco Javier Trujillo Vilches, como cotutor del proyecto, por sus útiles sugerencias.

A ambos, por permitirme contribuir con mi trabajo al desarrollo del Museo Virtual de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga.

A mi familia, amigos y demás seres queridos que me han apoyado y han contribuido a mi desarrollo universitario, profesional y personal.

Resumen.

La máquina de vapor es considerada como uno de los grandes iconos de la primera Revolución Industrial. Esta máquina posibilitó disponer de una energía deslocalizada como fuente de movimiento, independizándose de la fuerza muscular humana o animal, la presencia temporal del viento y la ubicación junto a cauces fluviales. Esto supuso un gran cambio en la forma de impulsar la maquinaria, propiciando la extensión de la industria y de nuevos desarrollos tecnológicos. El ingeniero James Watt suele considerarse como la figura más representativa en su invención. Sin embargo, los desarrollos tecnológicos no son espontáneos ni atribuibles a un único y genial inventor, sino resultado del trabajo de muchos individuos.

En este TFM se va a analizar la evolución de la máquina de vapor, como un proceso de mejora continua, en el que las limitaciones que presentaban los desarrollos de cada inventor permitieron a los siguientes ascender un nuevo escalón. Para ello se estudiarán los avances de la tecnología del vapor a lo largo de la historia de la humanidad, desde la Antigua Grecia hasta la Primera Revolución Industrial, y se estudiarán, entre otras, las máquinas de vapor de Thomas Savery y Thomas Newcomen, hasta llegar a los dos diseños de Watt, diferenciando sus características mecánicas y térmicas, sus configuraciones, los materiales empleados, sus dimensionados y las capacidades de trabajo. Se generará un modelo virtual de las máquinas de Newcomen y de Watt, a fin de analizar su comportamiento y simular su funcionamiento. Finalmente se realizará un diseño museológico dentro de una sala del Museo Virtual de la EII de la UMA.

Palabras Clave: Máquina de Vapor, Newcomen, Watt, Museo Virtual, Modelización, Musealización, Patrimonio Industrial.

Summary.

The steam engine is considered one of the great icons of the First Industrial Revolution. This machine made it possible to have a decentralized energy source to provide movement, freeing industry from reliance on human or animal muscle power, the temporary presence of wind, and the need to be located near fluvial channels. This represented a major shift in the way machinery was powered, fostering industrial expansion and new technological developments. The engineer James Watt is often regarded as the most representative figure in its invention. However, technological advancements are neither spontaneous nor attributable to a single genius inventor but rather the result of many individuals' works.

This master's dissertation will analyse the evolution of the steam engine as a process of continuous improvement, in which the limitations of each inventor's developments allowed the next to take another step forward. To achieve this, the study will cover the advancements in steam's technology throughout human history, since Ancient Greece until the First Industrial Revolution, and then, among others, the steam engines of Thomas Savery and Thomas Newcomen, leading up to Watt's two designs, will be studied, distinguishing their mechanical and thermal characteristics, configurations, materials employed, dimensions, and work capacities. A virtual model of each solution will be created to analyse its behaviour and simulate its operation. Finally, a museum design will be developed within a hall of the Virtual Museum of the "Escuela de Ingenierías Industriales" of the "Universidad de Málaga".

Keywords: Steam Engine, Newcomen, Watt, Virtual Museum, Modeling, Musealizing, Industrial Heritage.

Índice de Contenidos.

Resumen.....	vii
Summary.....	ix
1. Introducción.	1
2. Objetivos.	3
3. Historia del Desarrollo de la Máquina de Vapor.....	5
3.1. Los comienzos de la utilización de la energía del vapor.	5
3.2. La minería y el desarrollo de la máquina de vapor.....	7
3.3. Historia del desarrollo de la máquina de vapor. Línea del Tiempo.	15
4. Preparativos para el modelado digital de las máquinas de vapor.....	17
4.1. Selección de las máquinas de vapor a modelar.....	17
4.2. Búsqueda bibliográfica de las máquinas de vapor de Newcomen y Watt.	17
4.3. Elección del software CAD empleado para realizar los modelos digitales de las máquinas.	20
5. Modelado digital de las máquinas de vapor de Newcomen y de Watt.....	23
5.1. División de las máquinas en grupos funcionales.....	23
5.1.1. Grupos funcionales establecidos para la máquina de Newcomen.	24
5.1.2. Grupos funcionales establecidos para la máquina de Watt.	24
5.2. Adopción de una nomenclatura organizativa para los archivos CAD.	25
5.3. Adaptación de los dibujos bidimensionales de la máquina Newcomen al entorno CAD tridimensional.	26
5.4. Realización de las piezas CAD de la máquina de Newcomen.....	28
5.4.1. Diseño de las piezas observables en la figura 16.	28
5.4.2. Diseño de las piezas no observables en la figura 16 pero sí en otra fuente de información.	28
5.4.3. Diseño de las piezas no observables en la figura 16 o en otras fuentes de información.	33
5.5. Realización de los ensamblajes CAD de la máquina de Newcomen.	34
5.5.1. Resultado de los sub-ensamblajes de la máquina Newcomen.	34
5.5.2. Resultado del ensamblaje general completo de la máquina Newcomen.	47
5.6. Realización de las piezas CAD adicionales para la máquina de Watt y superposición de éstas sobre el modelo de la máquina de Newcomen.	49
5.6.1. Resultado de los sub-ensamblajes de la máquina de Watt que añaden los elementos de mejora térmica sobre la de Newcomen.	50

5.6.2. Resultado del ensamblaje general completo de la máquina de Watt.....	53
6. Post-modelado de las máquinas de Newcomen y de Watt.....	57
6.1. Asignación de los materiales a la piezas CAD diseñadas.....	57
6.2. Aplicación de las apariencias reales de los materiales a las piezas CAD diseñadas.	59
6.3. Exposición de los renderizados finales de las máquinas modeladas.	63
6.4. Conversión de los archivos <i>SolidWorks</i> a archivos <i>STEP</i> para su exportación al museo virtual.	64
6.5. Modelado digital de las máquinas de vapor. Esquema de Procedimiento.	64
7. Estudio de funcionalidad de las máquinas de vapor.	67
7.1. Preparación para el estudio de funcionalidad.....	67
7.2. Estudio de funcionalidad de la máquina de Newcomen.....	67
7.2.1. Fase de Carga.....	68
7.2.1.1. Gobierno de la fase de carga de la máquina mediante el cierre de la válvula de vapor.....	75
7.2.2. Fase de Potencia.....	81
7.2.2.1. Gobierno del inicio de la fase de potencia de la máquina mediante la apertura de la válvula de inyección.....	81
7.2.2.2. Funcionamiento de la máquina de Newcomen durante el recorrido de descenso del pistón principal.....	85
7.2.2.3. Gobierno del descenso del pistón principal, durante la fase de potencia de la máquina, mediante el cierre de la válvula de inyección y la apertura de la válvula de vapor.	91
7.2.3. Elemento adicional. Lubricación del pistón principal.....	100
7.3. Estudio de funcionalidad de la máquina de Watt.	101
7.3.1. Camisa Térmica.....	101
7.3.2. Condensador.....	104
7.4. Características funcionales de las máquinas de Newcomen y de Watt.	109
8. Estudio Estructural de las máquinas de vapor.....	111
8.1. Objeto.....	111
8.2. Modelo.	111
8.2.1. Geometría.	111
8.2.2. Materiales Asignados.	112
8.2.3. Modelo Resultante.	113
8.3. Preparación de la Simulación.	113
8.3.1. Sujeciones.....	113

8.3.2. Cargas.....	114
8.3.2.1. Gravedad.....	114
8.3.2.2. Peso de los elementos que cuelgan de la cadena.....	114
8.3.2.3. Fuerza resultante del vacío generado en el cilindro principal.....	116
8.3.3. Mallado.....	117
8.4. Resultados de la Simulación.....	118
8.5. Resumen y evaluación de los resultados del estudio estructural de las máquinas de vapor.....	120
9. Estudio Termodinámico de las máquinas de vapor.....	123
9.1. Introducción al análisis termodinámico de las máquinas.....	123
9.2. Metodología de cálculo.....	125
9.2.1. Análisis de la caldera.....	125
9.2.2. Análisis del sistema de bombeo.....	128
9.2.3. Análisis de las pérdidas mecánicas.....	131
9.2.4. Análisis de la eficiencia global de la máquina.....	132
9.2.5. Análisis de la eficiencia térmica del cilindro principal y del condensador.....	133
9.3. Resumen y evaluación de los resultados del estudio termodinámico de las máquinas de vapor de Newcomen y de Watt.....	135
10. Conclusiones.....	137
11. Líneas futuras de trabajo.....	139
12. Bibliografía.....	141
ANEXOS.....	i
Anexo I. Biblioteca CAD de la versión del modelo de la máquina de Newcomen con apariencias reales.....	i
Anexo II. Biblioteca CAD de la versión del modelo de la máquina de Newcomen con colores llamativos para la demostración funcional.....	vii
Anexo III. Biblioteca CAD de la versión del modelo de la máquina de Watt con apariencias reales.....	xiii
Anexo IV. Biblioteca CAD de la versión del modelo de la máquina de Watt con colores llamativos para la demostración funcional.....	xix
Anexo V. Código MATLAB del estudio termodinámico de la máquina de Newcomen.....	xxv
Anexo VI. Código MATLAB del estudio termodinámico de la máquina de Watt.....	xxvi
Anexo VII. Patente de la primera máquina de vapor de James Watt.....	xxvii
Anexo VIII. Patente de la segunda máquina de vapor de James Watt.....	xxx

Índice de Figuras.

Figura 1: Esquema del Architrón de Arquímedes [2].	5
Figura 2: Ilustración de la Eolípila de Herón [4] (izquierda) y del mecanismo de apertura y cierre automático de las puertas de un templo de Herón [5] (derecha).	6
Figura 3: Extracto del Códice Atlántico, en el que se muestran los dibujos y descripción que Leonardo Da Vinci realizó del Architrón de Arquímedes [7].	7
Figura 4: Dibujo de la máquina de Jerónimo de Ayanz, extraído del Archivo General de Simancas [8].	8
Figura 5: Esquema que muestra el funcionamiento de la máquina de vapor de Somerset [6].	8
Figura 6: Esquema que muestra el funcionamiento de la máquina de vapor de Savery [6].	9
Figura 7: Esquema que muestra el funcionamiento de la máquina de vapor de Papin [6].	9
Figura 8: Gráfico acumulativo de la cantidad de máquinas de vapor de Newcomen y de Watt fabricadas en Gran Bretaña [14].	10
Figura 9: Comparación entre las máquinas de vapor de Thomas Newcomen (izquierda) y de James Watt (derecha) [6].	12
Figura 10: Esquema de la máquina de vapor rotativa patentada por Watt, con la configuración sol-planeta y el regulador centrífugo [17].	13
Figura 11: Configuración perfeccionada de la máquina de vapor rotativa de Watt, con el volante de inercia, el mecanismo biela-manivela y el mecanismo de cuatro barras [6].	13
Figura 12: Dibujos de las máquinas de vapor a alta presión compuesta de Jonathan Hornblower [18] (izquierda) y de Arthur Woolf [19] (derecha).	14
Figura 13: Maqueta de la primera locomotora funcional, de Richard Trevithick, expuesta en la Casa de la Cultura de Nuevo León [20].	15
Figura 14: Dibujo del carruaje anfibio de Oliver Evans. Como se puede observar, se trata de una mezcla de vehículo terrestre y bote acuático [21].	15
Figura 15: Línea del tiempo mostrando los años en los que se realizaron avances en la tecnología del vapor, las épocas de la historia en las que se dieron y los nombres junto con una ilustración de los personajes históricos responsables de dichos avances.	16
Figura 16: Dibujo de la primera máquina de vapor de Newcomen, instalada en las minas de carbón del castillo de Dudley, realizado por Thomas Barney [14].	18
Figura 17: Extracto de la patente de la máquina de vapor de James Watt, de 1769, en la cual se describe detalladamente los principios funcionales de los elementos que añade sobre las máquinas de vapor de Newcomen, para mejorar su rendimiento térmico [15].	19

Figura 18: Dibujo de la máquina de vapor de James Watt, patentada en el año 1769, la cual mejora el rendimiento térmico de las máquinas Newcomen [17].	20
Figura 19: Logotipo del software SolidWorks, de la empresa francesa, Dassault Systèmes [22].	22
Figura 20: Captura del entorno de diseño de pieza de SolidWorks, en el cual se ha diseñado el cilindro principal de la máquina de Newcomen.	28
Figura 21: Dibujo detallado de todos los elementos que componen la válvula de vapor de la máquina de Newcomen [14].	29
Figura 22: Esquema simplificado de la válvula de vapor de la máquina de Newcomen [14].	29
Figura 23: Esquema simplificado de todos los componentes de la válvula de inyección de la máquina de Newcomen [14].	30
Figura 24: Fotografía incluida en el libro de LTC Rolt y JS Allen de un pistón de la máquina de Newcomen [14].	30
Figura 25: Modelo digital del link horizontal (horizontal link) de la válvula de vapor de la máquina de Newcomen.	31
Figura 26: Modelo digital de la palanca F (F lever) de la válvula de inyección de la máquina de Newcomen.	31
Figura 27: Modelo digital del cuerpo del pistón del cilindro principal de la máquina de Newcomen.	31
Figura 28: Esquema de las bombas aspirantes (izquierda) y aspirantes-impelentes (derecha) [23].	32
Figura 29: Modelo digital del cuerpo de la bomba hidráulica de la máquina de Newcomen.	32
Figura 30: Conjunto de piezas de una de las válvulas antirretorno diseñada, en el interior de una de las tuberías de la máquina Newcomen.	33
Figura 31: Conjunto de piezas del diseño simplificado del eje sobre el que pivota la viga elevadora.	33
Figura 32: Sub-ensamblaje 01-01-00, respectivo al Cilindro Principal de la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa (izquierda) y vista general de sección (derecha).	35
Figura 33: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-01-00, respectivo al Cilindro Principal.	35
Figura 34: Sub-ensamblaje 01-02-00, respectivo a la Caldera de la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa (izquierda) y vista general de sección (derecha).	35
Figura 35: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-02-00, respectivo a la Caldera.	36

Figura 36: Sub-ensamblaje 01-03-00, respectivo a la Edificio en la que se instala la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa (izquierda) y vista general de sección (derecha).....	37
Figura 37: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-03-00, respectivo a la Edificio en la que se instala la máquina.	37
Figura 38: Sub-ensamblaje 01-04-00, respectivo a la Viga Elevadora de la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa.	38
Figura 39: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-04-00, respectivo a la Viga Elevadora.	38
Figura 40: Sub-ensamblaje 01-05-00, respectivo a la Bomba Hidráulica principal de la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa.	39
Figura 41: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-05-00, respectivo a la Bomba Hidráulica principal.	39
Figura 42: Sub-ensamblaje 01-06-00, respectivo a la Válvula de Vapor de la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa.	40
Figura 43: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-06-00, respectivo a la Válvula de Vapor.	40
Figura 44: Sub-ensamblaje 01-07-00, respectivo a la Válvula de Inyección de la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa (izquierda) y vista general de sección (derecha).	40
Figura 45: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-07-00, respectivo a la Válvula de Inyección.	41
Figura 46: Sub-ensamblaje 01-08-00, respectivo a la Tubería Maestra y Ramas al cilindro principal de la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa.	41
Figura 47: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-08-00, respectivo a la Tubería Maestra y Ramas.	41
Figura 48: Sub-ensamblaje 01-09-00, respectivo a la Tubería de Desagüe del Depósito Superior de la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa.	42
Figura 49: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-09-00, respectivo a la Tubería de Desagüe del Depósito Superior.	42
Figura 50: Sub-ensamblaje 01-10-00, respectivo a la Tubería de Recirculación entre el cilindro y la caldera de la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa.	42
Figura 51: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-10-00, respectivo a la Tubería de Recirculación entre el cilindro y la caldera.	42

Figura 52: Sub-ensamblaje 01-11-00, respectivo a la Tubería de Desagüe del cilindro principal de la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa.	43
Figura 53: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-11-00, respectivo a la Tubería de Desagüe del cilindro principal.....	43
Figura 54: Sub-ensamblaje 01-12-00, respectivo a los Elementos Externos al edificio en el que se instala la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa.....	43
Figura 55: Sub-ensamblaje 01-12-00, respectivo a los Elementos Externos al edificio en el que se instala la máquina de vapor de Newcomen. Vista general de sección.....	44
Figura 56: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-12-00, respectivo a los Elementos Externos al edificio.....	44
Figura 57: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-12-00, respectivo a los Elementos Externos al edificio (Continuación).....	45
Figura 58: Sub-ensamblaje 01-13-00, respectivo a la Cadena entre la viga elevadora y el pistón del cilindro principal de la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa.	45
Figura 59: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-13-00, respectivo a la Cadena entre la viga elevadora y el pistón del cilindro principal.....	45
Figura 60: Sub-ensamblaje 01-14-00, respectivo a la Cadena entre el vástago principal de la bomba de la mina y la viga elevadora de la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa.	45
Figura 61: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-14-00, respectivo a la Cadena entre el vástago principal de la bomba de la mina y la viga elevadora.....	46
Figura 62: Sub-ensamblaje 01-15-00, respectivo a la Cadena Inferior entre la viga elevadora y el vástago de la bomba hidráulica principal de la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa.	46
Figura 63: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-15-00, respectivo a la Cadena Inferior entre la viga elevadora y el vástago de la bomba hidráulica principal.	46
Figura 64: Sub-ensamblaje 01-16-00, respectivo a la Cadena Superior entre la viga elevadora y el vástago de la bomba hidráulica principal de la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa.	46
Figura 65: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-16-00, respectivo a la Cadena Superior entre la viga elevadora y el vástago de la bomba hidráulica principal.	47
Figura 66: Ensamblaje general de la máquina de vapor de Newcomen, 01-00-00. Vista general completa cercana.....	47

Figura 67: Ensamblaje general de la máquina de vapor de Newcomen, 01-00-00. Vista general de sección cercana.....	48
Figura 68: Ensamblaje general de la máquina de vapor de Newcomen, 01-00-00. Vista general de sección lejana.....	48
Figura 69: Lista de sub-ensamblajes que forman el ensamblaje general 01-00-00, del modelo digital de la máquina de vapor de Newcomen.	49
Figura 70: Dibujo de una vista de sección del condensador de la máquina de vapor de Watt [24].	49
Figura 71: Sub-ensamblaje 01-01-00, respectivo al Cilindro Principal, con cerramiento superior y encapsulamiento por camisa térmica, de la máquina de vapor de Watt. Vista general completa (izquierda) y vista general de sección (derecha).....	50
Figura 72: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-01-00, respetivo al Cilindro Principal.	51
Figura 73: Sub-ensamblaje 01-06-00, respectivo al Condensador de la máquina de vapor de Watt. Vista general completa (izquierda) y vista general de sección (derecha).	51
Figura 74: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-06-00, respetivo al Condensador. 51	
Figura 75: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-06-00, respetivo al Condensador (continuación).	52
Figura 76: Sub-ensamblaje 01-16-00, respectivo a la Tubería de Vaciado del Vapor de la parte Superior del Cilindro al Condensador de la máquina de vapor de Watt. Vista general completa.	52
Figura 77: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-16-00, respetivo a la Tubería de Vaciado de la parte Superior del Cilindro al Condensador.....	52
Figura 78: Sub-ensamblaje 01-17-00, respectivo a la Tubería de Vaciado del Vapor de la parte Inferior del Cilindro al Condensador de la máquina de vapor de Watt. Vista general completa.	53
Figura 79: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-17-00, respetivo a la Tubería de Vaciado de la parte Inferior del Cilindro al Condensador.	53
Figura 80: Ensamblaje general de la máquina de vapor de Watt, 01-00-00. Vista general completa	54
Figura 81: Ensamblaje general de la máquina de vapor de Watt, 01-00-00. Vista general de sección central.	54
Figura 82: Ensamblaje general de la máquina de vapor de Watt, 01-00-00. Vista general de sección del condensador.....	55

Figura 83: Lista de sub-ensamblajes que forman el ensamblaje general 01-00-00, del modelo digital de la máquina de vapor de Watt.....	55
Figura 84: Interfaz de la biblioteca “Apariencias, escenas y calcomanías”, dentro de SolidWorks.	59
Figura 85: Imagen utilizada como apariencia real de las tejas de la cubierta del edificio [25]. ..	59
Figura 86: Ensamblaje general de la máquina de vapor de Newcomen, 01-00-00, con las apariencias realistas de los materiales. Vista general completa cercana.	60
Figura 87: Ensamblaje general de la máquina de vapor de Newcomen, 01-00-00, con las apariencias realistas de los materiales. Vista general de sección cercana. Nota: Las apariencias de los ladrillos desaparecen en la vista de sección, debido a que éstas fueron asignadas a superficies, en lugar de a sólidos.....	60
Figura 88: Ensamblaje general de la máquina de vapor de Newcomen, 01-00-00, con las apariencias realistas de los materiales. Vista general de sección lejana.	61
Figura 89: Ensamblaje general de la máquina de vapor de Watt, 01-00-00, con las apariencias realistas de los materiales. Vista general completa.....	61
Figura 90: Ensamblaje general de la máquina de vapor de Watt, 01-00-00, con las apariencias realistas de los materiales. Vista general de sección central. Nota: Las apariencias de los ladrillos desaparecen en la vista de sección, debido a que éstas fueron asignadas a superficies, en lugar de a sólidos.	62
Figura 91: Ensamblaje general de la máquina de vapor de Watt, 01-00-00, con las apariencias realistas de los materiales. Vista general de sección del condensador.	62
Figura 92: Captura de la portada de iniciación del programa SolidWorks Visualize.	63
Figura 93: Renderizado realista final de la máquina de vapor de Newcomen modelada.....	63
Figura 94: Renderizado realista final de la máquina de vapor de Watt modelada.	64
Figura 95: Esquema del procedimiento de diseño seguido a lo largo del proyecto.....	65
Figura 96: Escotilla de llenado y medidor de la altura del agua, colocados sobre la cúpula de la caldera.	68
Figura 97: Detalle del medidor de agua de la caldera.....	68
Figura 98: Válvula de vaciado de la caldera, junto con la tubería que va desde la base de la caldera hasta la salida de la válvula.....	68
Figura 99: Apertura de la compuerta de introducción del carbón en la caldera y depósito de ceniza.	69
Figura 100: Vista de sección para mostrar el plato-rejilla donde se deposita el carbón, así como la cavidad entre el cilindro de la caldera y el ladrillo que la encapsula, y el flujo de los gases producto de la combustión del carbón.	69

Figura 101: Detalle del plato-rejilla del carbón, en el cual se puede observar el hueco por el cual se cuela la ceniza producida.	70
Figura 102: Flujo del vapor generado, cuando la compuerta de la válvula de vapor está abierta.	70
Figura 103: Detalle de la compuerta de la válvula de vapor, en su posición abierta.	71
Figura 104: Viga elevadora y los elementos que cuelgan de ella, en sus posiciones iniciales de la fase de carga de la máquina.	71
Figura 105: Fuerzas ejercidas sobre la viga elevadora (en naranja), debidas al balance de fuerzas entre el peso del volumen de agua a desplazar y los pesos de los elementos que cuelgan sobre la viga y al balance de presiones que actúan sobre el pistón principal, momento resultante sobre el eje de giro de la viga (en naranja) y desplazamientos de los elementos (en celeste), durante la fase de carga.	71
Figura 106: Vista de sección en la cual se puede observar el vástago de la bomba del interior del edificio, conectado al pistón del cilindro de la bomba.	72
Figura 107:Detalle de la bomba del interior del edificio y desplazamiento de su pistón, durante la fase de carga.	72
Figura 108: Detalle de la válvula de succión del agua del pozo subterráneo al cilindro de la bomba, en su posición abierta.	72
Figura 109: Válvula antirretorno de la bomba del edificio, colocada en el interior de la tubería maestra, cerrada durante la fase de carga.	73
Figura 110: Cubos de desagüe y conducciones hidráulicas, colocados en el interior de la mina.	73
Figura 111: Desplazamiento del pistón a través del cilindro de la bomba de desagüe, durante la fase de carga, y tubería que conecta con el nivel estático del pozo de agua subterráneo del edificio.	74
Figura 112: Válvulas antirretorno de la bomba de desagüe para la correcta conducción del agua, durante la fase de carga.	74
Figura 113: Pasador (en amarillo) del vástago de la bomba (en azul), en contacto con la palanca en 'V' (en morado), al inicio de la carrera ascendente del pistón.	75
Figura 114: Pasador de nuevo en contacto con la palanca en 'V', una vez transcurrido una cierta porción de la carrera ascendente del pistón.	76
Figura 115: Rotación de las palancas 'V' (en morado) y 'Y' (en verde), sobre su eje (en amarillo), provocada por el ascenso del vástago de la bomba del edificio, durante la fase de carga.	76

Figura 116: Cadena de movimientos del mecanismo de la válvula de vapor, causados por la rotación de la viga elevadora, durante la fase de carga. Elementos: Eslabón horizontal (en azul), Pasador del eslabón horizontal (en amarillo), Llave de la válvula de vapor (en morado) y husillo de la llave y de la compuerta de vapor (en amarillo).	77
Figura 117: Posición que ocupa el pistón y los elementos de la válvula de vapor de la máquina, en el momento en el que entra en acción el macizo de plomo de la palanca 'Y' (en rojo).	77
Figura 118: Rotación acelerada de la palanca 'Y', causada por el desequilibrio proporcionado por el peso del macizo de plomo.	78
Figura 119: Posición de las palancas 'Y' y 'V' y del pistón principal y ascensos del pistón y del vástago de la bomba del edificio, una vez terminan de rotar y la válvula de vapor está completamente cerrada.	78
Figura 120: Posición de los distintos elementos de la válvula de vapor y del pistón en el momento en el que esta se ha cerrado por completo.	79
Figura 121: Fuerzas ejercidas sobre la viga elevadora por parte de los elementos que cuelgan de ella (en naranja), momento resultante sobre el eje de giro de la viga elevadora (en naranja) y desplazamientos de estos elementos (en celeste), desde el momento en el que se cierra la válvula de vapor por completo hasta que el pistón llega a su final de carrera de la fase de carga.	80
Figura 122: Vista frontal de la máquina de Newcomen en el momento en el que termina su fase de carga. Cadenas de eslabones sustituidas por conexiones simplificadas, para el estudio de funcionalidad, rodeadas en rojo.	80
Figura 123: Vista isométrica de la máquina de Newcomen en el momento en el que termina su fase de carga.	81
Figura 124: Elementos de la válvula de inyección de agua, en la posición cerrada.	82
Figura 125: Exterior de la llave de la válvula de inyección (izquierda) e interior de la tubería de inyección de agua al cilindro y de la llave de la válvula de inyección, en la posición cerrada de la misma (derecha).	83
Figura 126: Transmisión de los movimientos de la válvula de inyección, durante su apertura. .	83
Figura 127: Elementos de la válvula de inyección de agua, en su posición abierta, y consecuente flujo de agua al cilindro principal.	84
Figura 128: Interior de la tubería de inyección de agua al cilindro y de la llave de la válvula de inyección, en la posición cerrada de la misma, y flujo del agua hacia el cilindro principal.	84

Figura 129: Flujo de agua (en celeste) después de que la válvula de inyección haya sido abierta y antes de que el pistón comience su recorrido de bajada.	85
Figura 130: Fuerzas ejercidas sobre la viga elevadora (en naranja), debidas al balance de fuerzas entre el peso del volumen de agua a desplazar y los pesos de los elementos que cuelgan sobre la viga y al balance de presiones que actúan sobre el pistón principal, momento resultante sobre el eje de giro de la viga (en naranja) y desplazamientos de los elementos (en celeste), durante la fase de potencia.....	86
Figura 131: Vista de sección en la cual se puede observar el vástago de la bomba del interior del edificio, conectado al pistón del cilindro de la bomba, al inicio de la fase de potencia de la máquina.	86
Figura 132: Detalle de la bomba del interior del edificio y desplazamiento de su pistón, durante la fase de potencia.....	87
Figura 133: Detalle de la válvula de la base del cilindro (en verde) de la bomba del edificio, en su posición cerrada, y flujo del agua fuera del cilindro, a través de la válvula antirretorno (en azul).	87
Figura 134: Flujo del agua a través de la tubería maestra y su rama que va a la parte inferior del cilindro principal, desde el momento en el que el pistón comienza su descenso hasta que se cierra la válvula de inyección.....	87
Figura 135: Flujo del agua sobrante del depósito superior hacia fuera del edificio.	88
Figura 136: Flujo del agua que se desagua del inferior del cilindro principal hacia fuera del edificio.	89
Figura 137: Válvula antirretorno de la tubería de desagüe del inferior del cilindro principal, la cual evita la succión del agua dentro de la tubería hacia el pistón.....	89
Figura 138: Desplazamiento ascendente del vástago central del sistema de bombeo de la mina.	90
Figura 139: Desplazamiento del pistón a través del cilindro de la bomba de desagüe, durante la fase de potencia.....	90
Figura 140: Válvulas antirretorno de la bomba de desagüe para la correcta conducción del agua, durante la fase de potencia.	91
Figura 141: Pasador (en amarillo) del vástago de la bomba (en azul), en contacto con la palanca en 'F' (en rosa), al inicio de la carrera descendente del pistón. Desplazamientos del pistón y del vástago de la bomba.	92
Figura 142: Pasador en contacto con la palanca en 'V' (en azul), de la válvula de vapor, una vez transcurrido una cierta porción de la carrera descendente del pistón. Desplazamientos del pistón y del vástago de la bomba.....	92

Figura 143: Rotación de las palancas 'V' (en morado) y 'Y' (en verde), sobre su eje (en amarillo), provocada por el descenso del vástago de la bomba del edificio, durante la fase de potencia.	93
Figura 144: Cadena de movimientos del mecanismo de la válvula de vapor, causados por la rotación de la viga elevadora, durante la fase de potencia. Elementos: Eslabón horizontal (en azul), Pasador del eslabón horizontal (en amarillo), Llave de la válvula de vapor (en morado) y husillo de la llave y de la compuerta de vapor (en amarillo).	93
Figura 145: Posición que ocupa el pistón y los elementos de la válvula de vapor de la máquina, en el momento en el que entra en acción el macizo de plomo de la palanca 'Y' (en rojo).	94
Figura 146: Rotación acelerada de la palanca 'Y', causada por el desequilibrio proporcionado por el peso del macizo de plomo.	95
Figura 147: Posición de las palancas 'Y', 'V' y 'F' y del pistón principal y descensos del pistón y del vástago de la bomba del edificio, una vez terminan de rotar y la válvula de vapor está completamente abierta.	95
Figura 148: Posición de los distintos elementos de la válvula de vapor, de la palanca 'F' de la válvula de inyección y del pistón en el momento en el que la válvula de vapor se ha abierta por completo.	96
Figura 149: Fuerzas ejercidas sobre la viga elevadora por parte de los elementos que cuelgan de ella (en naranja), momento resultante sobre el eje de giro de la viga elevadora (en naranja) y desplazamientos de estos elementos (en celeste), desde el momento en el que se abre la válvula de vapor por completo hasta que el pistón llega a su final de carrera de la fase de potencia.....	97
Figura 150: Transmisión de los movimientos de la válvula de inyección, durante su cierre.....	98
Figura 151: Válvula de inyección completamente cerrada y posición que ocupa todos sus elementos al final de la fase de potencia.	98
Figura 152: Vista frontal de la máquina de Newcomen en el momento en el que termina su fase de potencia.	99
Figura 153: Vista isométrica de la máquina de Newcomen en el momento en el que termina su fase de potencia.....	99
Figura 154: Flujo del agua de lubricación del pistón a través de la tubería maestra, y su rama que va a la parte superior del cilindro principal, y de la tubería de recirculación hacia la caldera.	100

Figura 155: Exterior de la camisa térmica que encapsula al cilindro principal de la máquina de Watt (izquierda) y vista de sección, en la que se observa el cerramiento del cilindro principal (derecha).....	101
Figura 156: Flujo de parte del vapor generado en la caldera, hacia el interior de la camisa térmica.	102
Figura 157: Flujo del vapor que entra y sale del cilindro, durante la fase de ascenso del pistón.	103
Figura 158: Flujo del vapor que entra y sale del cilindro, durante el descenso del pistón.	103
Figura 159: Localización del condensador en el edificio.	104
Figura 160: Bañera de refrigeración (en amarillo) y los cilindros (en morado) que componen el condensador.....	104
Figura 161: Vista de sección del condensador, en la cual se pueden observar todos sus elementos.	105
Figura 162: Flujo del vapor del cilindro hacia el cilindro de condensación y acumulación del agua generada por la condensación del vapor.	105
Figura 163: Flujo del agua del cilindro de condensación al cilindro de bombeo, durante la primera fase ascendente del pistón.	106
Figura 164: Válvula antirretorno de la tubería entre los cilindros de condensación y de bombeo abierta y válvulas tipo escotilla del pistón cerradas, durante la primera fase ascendente del pistón.	106
Figura 165: Flujo del agua desde la parte inferior a la superior del cilindro de bombeo, pasando a través del pistón, con sus válvulas tipo escotilla abiertas y la válvula antirretorno de la tubería de conexión entre los cilindros de condensación y de bombeo cerrada, durante la primera fase descendente del pistón.	107
Figura 166: Flujo del agua del cilindro de condensación al cilindro de bombeo y de éste al de acumulación, durante la segunda fase ascendente del pistón.	107
Figura 167: Válvula antirretorno de la tubería entre los cilindros de bombeo y de acumulación abierta y válvulas tipo escotilla del pistón cerradas, durante la segunda fase ascendente del pistón.	108
Figura 168: Flujo del agua desde la parte inferior a la superior del cilindro de bombeo, pasando a través del pistón, con sus válvulas tipo escotilla abiertas y la válvula antirretorno de la tubería de conexión entre los cilindros de bombeo y de acumulación cerrada, durante la segunda fase descendente del pistón.	108
Figura 169: Modelo utilizado para la simulación estructural de la cadena conectora del pistón principal y la viga elevadora.....	111

Figura 170: Medidas de los eslabones diseñados para la cadena simulada.	112
Figura 171: Sujeciones establecidas a la cadena.....	113
Figura 172: Fuerza gravitatoria aplicada sobre la cadena.	114
Figura 173: Elementos que cuelgan de la cadena simulada.....	115
Figura 174: Peso aplicado sobre la cadena.	116
Figura 175: Fuerza que actúa sobre la cadena, debida al balance de presiones en el pistón del cilindro cuando se genera un vacío en la parte inferior del pistón.....	117
Figura 176: Malla generada para la simulación.....	118
Figura 177: Resultados de la Tensiones de von Mises en la cadena.	119
Figura 178: Resultados del Factor de Seguridad de la cadena.	119
Figura 179: Resultados de los Desplazamientos de la cadena.	120
Figura 180: Logotipo del software de computación numérica, MATLAB [27].	123
Figura 181: Modelo de bloques representativo del modelo termodinámico de las máquinas de Newcomen y Watt [30]. Nota: Consultar la Tabla 11 para ver la traducción y significado de estos parámetros del inglés al español.....	123
Figura 182: Representación gráfica de la eficiencia de la caldera [30].	126
Figura 183: Principales pérdidas de eficiencia asociadas a la caldera.....	126
Figura 184: Representación gráfica de la eficiencia del sistema de bombeo.....	128
Figura 185: Pérdidas de eficiencia asociadas a las bombas.	128
Figura 186: Representación gráfica de la eficiencia mecánica de las máquinas.	131
Figura 187: Representación gráfica de la eficiencia mecánica de las máquinas.	133
Figura 188: Pérdidas térmicas y mecánicas asociadas al cilindro. Máquina de Newcomen.	134
Figura 189: Pérdidas térmicas asociadas al cilindro. Máquina de Watt.	134
Figura 190: Pérdidas térmicas asociadas al condensador. Máquina de Watt.	135

Índice de Tablas.

Tabla 1: Resumen de las figuras que muestran los sub-ensamblajes generados para el modelo digital de la máquina de Newcomen.	34
Tabla 2: Resumen de las figuras que muestran los sub-ensamblajes generados para el modelo digital de la máquina de Watt y que contienen elementos añadidos sobre la máquina de Newcomen.	50
Tabla 3: Propiedades otorgadas al material personalizado “Cuero”.	57
Tabla 4: Resumen de los materiales utilizados en los modelos digitales de las máquinas, junto con sus justificaciones.	58
Tabla 5: Resumen de las principales características del funcionamiento de las máquinas de vapor de Newcomen y de Watt.	109
Tabla 6: Medidas otorgadas al diseño de los eslabones para la cadena simulada.	112
Tabla 7: Propiedades del material utilizado para la cadena de eslabones simulada (Acero AISI 1020).	112
Tabla 8: Desglose de las masas de los elementos que cuelgan sobre la cadena.	115
Tabla 9: Datos de la malla generada para la simulación.	117
Tabla 10: Resumen de los resultados de la simulación realizado de la cadena, durante el estudio estructural de las máquinas de vapor modeladas.	121
Tabla 11: Parámetros utilizados y calculados en el estudio termodinámico de las máquinas de Newcomen y de Watt.	124
Tabla 12: Resumen de resultados obtenidos para el estudio termodinámico de las máquinas de Newcomen y de Watt.	135

1. Introducción.

La Revolución Industrial fue un periodo de profundos cambios tecnológicos, económicos y sociales que transformó la manera en que la humanidad producía bienes y generaba energía. En este contexto, la invención y el perfeccionamiento de la máquina de vapor marcaron un hito fundamental, facilitando la producción masiva industrial, el desarrollo del transporte y el crecimiento de las ciudades. A lo largo del siglo XVIII y XIX, diversas versiones de esta máquina revolucionaron sectores como la minería, la manufactura textil y el ferrocarril, consolidando el papel de la tecnología como motor del progreso.

Sin embargo, a pesar de su importancia histórica, muchas de las primeras máquinas de vapor han desaparecido o se encuentran en museos con acceso limitado, dificultando su estudio y apreciación por parte del público general. Ante esta situación, las nuevas tecnologías digitales, en particular la realidad virtual (VR) ofrecen soluciones innovadoras para la conservación y divulgación del patrimonio industrial. La VR permite la creación de modelos interactivos y entornos inmersivos que recrean con precisión piezas históricas, ofreciendo experiencias educativas y accesibles a un público amplio.

De esta forma, nació el *Museo Virtual* de la *Escuela de Ingenierías Industriales (EII)* de la *Universidad de Málaga (UMA)*; un proyecto organizado por el *Grupo de Investigación en Ingeniería de Fabricación, TEP933-iFAB*, perteneciente al *Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación (PAIDI)* de la *Junta de Andalucía*.

Durante este trabajo final de máster, en el *Capítulo 3* de la presente memoria, se realiza un estudio histórico de cómo evolucionó el uso del vapor por parte del ser humano, hasta llegar a la máquina de vapor que se construyó años antes al estallido de la *Revolución Industrial* y que dio a pie a que dicho evento tuviese lugar: la máquina de vapor de *Thomas Newcomen*. Así mismo, y como parte fundamental del trabajo, durante los *Capítulos 4 a 6* se desarrolla un modelo digital de la primera máquina de vapor para su posterior incorporación al *Museo Virtual* de la *EII* de la *UMA* y se realiza un estudio exhaustivo del funcionamiento de dicho invento, con el fin de que tanto el lector de la presente memoria como los futuros usuarios del *Museo Virtual* puedan obtener el máximo conocimiento y provecho de su interacción con la máquina, en el entorno *VR*.

Además, el trabajo se extiende para desarrollar otro modelo digital para la máquina de vapor que se desarrolló durante los primeros años de la *Revolución Industrial*, la cual consistía en una mejora de su predecesora: la máquina de vapor de *James Watt*. De esta forma, el estudio de funcionalidad, desarrollado en el *Capítulo 7*, consiste tanto de un estudio exhaustivo del funcionamiento completo de la máquina de *Thomas Newcomen* como de las mejoras que la primera configuración de la máquina de *James Watt* incorporaba respecto a esta máquina.

Posteriormente, en el *Capítulo 8* se expone un estudio de resistencia de las cadenas de eslabones utilizadas en la máquina de vapor de *Newcomen*, mientras que en el *Capítulo 9* se presenta un estudio termodinámico aproximado para ambas máquinas, en el cual se analizan los distintos tipos de pérdidas energéticas que estas tenían (mecánicas y térmicas, entre otras) y poder, así,

cuantificar las mejoras que existían entre estos dos inventos que serán expuestos en el *Museo Virtual* de la *EII* de la *UMA*.

Finalmente, en el *Capítulo 10* se expondrán las conclusiones obtenidas al finalizar el trabajo y se evaluará el grado de satisfacción con la que los objetivos del proyecto, listados en el *Capítulo 2*, han sido cumplidos, mientras que en el *Capítulo 11* se dará una propuesta de posibles líneas de investigación futuras a desarrollar a partir del trabajo realizado en este Trabajo Final de Máster.

2. Objetivos.

El objetivo principal del proyecto presentado en esta memoria es el desarrollo de un modelo digital de las máquinas de vapor seleccionadas, las cuales constan de la de *Thomas Newcomen* y de la primera de *James Watt*, para su incorporación en el *Museo Virtual* de la *EII* de la *UMA*.

Para cumplir con este objetivo principal, el trabajo ha sido dividido en los siguientes objetivos secundarios:

- Realizar un estudio histórico de la evolución del uso del vapor por el ser humano, desde tantos años atrás como la documentación existente permita, hasta los años de la *Revolución Industrial*.
- Seleccionar el software en el que desarrollar los modelos digitales y obtener la documentación pertinente para poder llevarlos a cabo.
- Realizar los modelos digitales y adaptarlos para su correcta implementación al *Museo Virtual*.
- Estudiar el funcionamiento de las máquinas de vapor de forma exhaustiva, para el máximo aprovechamiento didáctico de los usuarios del *Museo Virtual* y cualquier otra persona interesada en estas máquinas.
- Estudiar la resistencia mecánica de un elemento de las máquinas de vapor que sea de interés y, así, establecer una metodología de cálculo estandarizada para realizar simulaciones estructurales sobre diferentes componentes de las máquinas de vapor modeladas y cuya resistencia mecánica durante el funcionamiento de la misma sean de especial interés.
- Cuantificar, mediante un análisis termodinámico, las pérdidas y los rendimientos de ambas máquinas de vapor, para evaluar finalmente cuan eficaces fueron las mejoras introducidas en una máquina respecto de la otra.

3. Historia del Desarrollo de la Máquina de Vapor.

Actualmente, existe un sólido consenso en que la máquina de vapor es el invento de mayor trascendencia de la *Primera Revolución Industrial (1760 – 1840)* [1]. Esto se debe a que su introducción en las distintas industrias derivó en un aumento sin precedentes de la capacidad productiva de estas, al sustituir la limitada fuerza de sangre, ya fuese humana o animal, por la superior fuerza del vapor. Además, la máquina de vapor permitió el empleo de una fuente de energía que no dependía de la localización de una corriente pluvial o de la intermitencia del viento.

A pesar de la atribución de la máquina de vapor como un invento de la revolución industrial, en realidad está documentado que esta fue una culminación de investigaciones e inventos similares llevados a cabo, por diversos inventores, durante algo más de un siglo antes del estallido de la revolución industrial. Sin embargo, el origen del empleo de la energía del vapor data de muchos siglos atrás.

Antes de comenzar con el estudio histórico, es conveniente mencionar que, a medida que se avanza en dicho estudio, puede ser de ayuda consultar la línea del tiempo incluida en el Apartado 3.3. de la presente memoria (Figura 15) para una mayor comprensión de la evolución temporal de la máquina de vapor. Además, en dicha línea temporal se puede observar una ilustración de cada inventor.

3.1. Los comienzos de la utilización de la energía del vapor.

La primera aplicación práctica del vapor como fuente de energía es atribuida a *Arquímedes de Siracusa (287 – 212 a.C.)*. El brillante matemático, físico, astrónomo e inventor de la *Grecia Helenística*, ideó el *Architronito* (Figura 1), un arma que consistía en un cañón de vapor capaz de proyectar objetos a gran velocidad. Este invento fue ideado y utilizado para la defensa de la ciudad de Siracusa contra el asedio llevado a cabo por parte de la república romana, durante el *Sitio de Siracusa (214 – 212 a.C.)* [1].

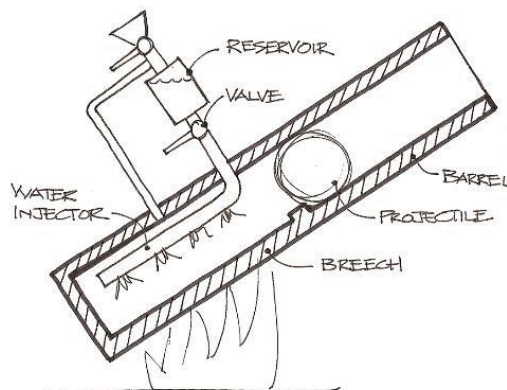


Figura 1: Esquema del Architronito de Arquímedes [2].

Dado que Arquímedes fue asesinado durante el asedio de Siracusa, no se tiene constancia de una continuación en el desarrollo del Architrónito, ni ningún otro invento que utilizase la energía del vapor, hasta pasado poco más de dos siglos. Fue en el *siglo I d.C.*, cuando *Herón de Alejandría (10 a.C. – 70 d.C.)* inventó la que es considerada como la primera máquina de vapor rotativa: la *Eolípila* (o el *Aelópilo*), observable en la Figura 2. A pesar de la gran proeza de tener dicha consideración, actualmente es apreciada como un juguete o adorno, ya que no tuvo ninguna utilidad más allá de la de maravillar a fieles religiosos con la divinidad que suponía, en aquellos años, una esfera capaz de rotar supuestamente sin la interferencia del hombre o animal.

Además, Herón inventó también un mecanismo de apertura y cierre automático de las puertas del templo de Isis (Figura 2). Este mecanismo utilizaba la fuerza del vapor, generado al encender un fuego en el altar durante un sacrificio, para abrir las puertas del templo y, a la vez, producir un sonido de trompeta. Aunque se podría decir que este invento es de mayor utilidad que el primero, la intención de ambos era la misma; atraer al mayor número de fieles religiosos en una época en la que existía una muy alta competencia entre las diferentes religiones existentes [3].

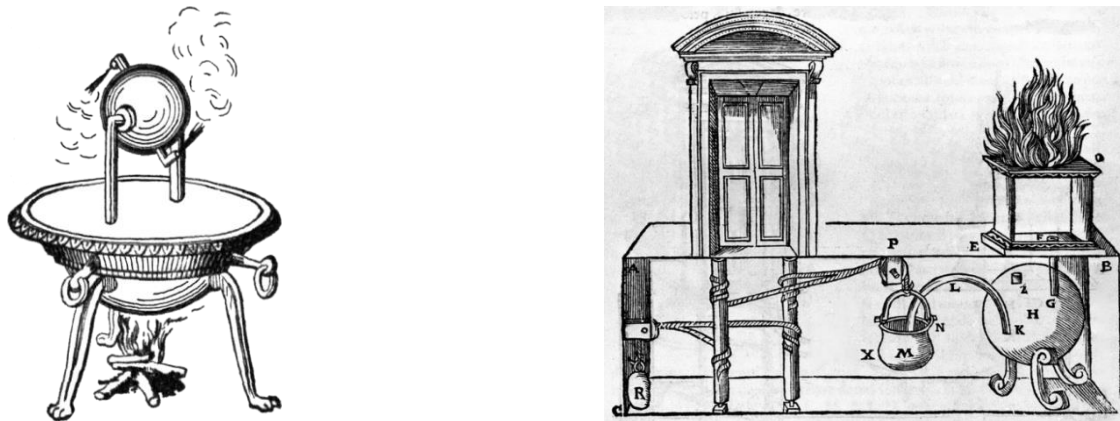


Figura 2: Ilustración de la Eolípila de Herón [4] (izquierda) y del mecanismo de apertura y cierre automático de las puertas de un templo de Herón [5] (derecha).

En los años posteriores a la muerte de Herón, se dan una serie de acontecimientos que tendrían grandes consecuencias sociales, políticas y religiosas, como la *caída del Imperio Romano Occidental (476 d.C.)*, dando inicio con ello a la *Edad Media (476 d.C. – 1492 d.C.)*, durante la cual los inventos relacionados con el vapor experimentaron un estancamiento de más de 15 siglos.

Hubo que esperar hasta *el Renacimiento* para que *Leonardo Da Vinci (1452 – 1519)* continuase los estudios de la energía del vapor. El gran polímata florentino conocía los escritos de *Arquímedes* y de *Herón* (Figura 3); dedicándose así a profundizar en la comprensión y documentación de sus inventos [6].

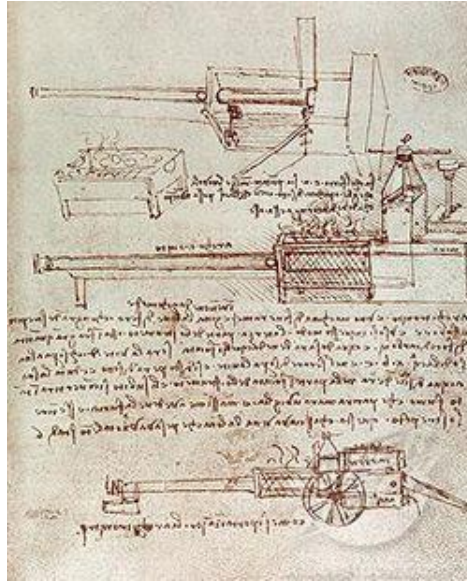


Figura 3: Extracto del Códice Atlántico, en el que se muestran los dibujos y descripción que Leonardo Da Vinci realizó del Architrónito de Arquímedes [7].

Es apreciable cómo, desde el *siglo III a.C.* hasta el *siglo XVI d.C.*, la energía del vapor fue utilizada, primero como arma y, posteriormente, como una fuerza capaz de maravillar a grupos religiosos. Después de *Da Vinci*, los conocimientos adquiridos hasta el momento sobre la energía del vapor convergieron hacia la resolución de ciertas problemáticas en el sector minero.

3.2. La minería y el desarrollo de la máquina de vapor.

En el *año 1606*; el militar, inventor, astrónomo, músico y pintor español, *Jerónimo de Ayanz (1555 – 1613)*, registró, en el *Archivo General de Simancas*, la patente de la primera máquina de vapor moderna (Figura 4). Además, esta invención de *Ayanz* fue la primera que utilizó la energía del vapor para el desagüe de minas, concretamente para las minas de plata de *Guadalcanal, Sevilla* [8].

Esta máquina consistía en un horno de leña que calentaba una caldera, denominada por *Ayanz* como la “*esfera de fuego*”, que, a su vez, calentaba el agua en su interior, produciendo así vapor. Este vapor fluía al interior de un depósito que contenía agua, forzándola al interior de un tubo de mucha menor sección. Cuando el agua pasaba de una sección mayor a una menor, se producía una disminución de la presión estática del fluido dentro del tubo, generando así un fenómeno de aspiración y elevando el agua hacia un depósito abierto a atmósfera y colocado a una cierta altura (Figura 4). Por lo tanto, *Ayanz* fue el primero en aprovechar, en su máquina de vapor, un fenómeno físico que no se demostró hasta 191 años después (en el *año 1797*), por el físico italiano *Giovanni Battista Venturi (1746 – 1822)*, y que es bien conocido en la actualidad como el “*Efecto Venturi*” [9].

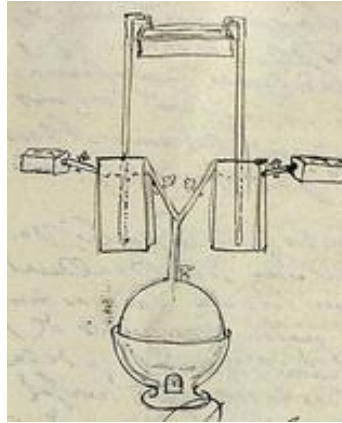


Figura 4: Dibujo de la máquina de Jerónimo de Ayanz, extraído del Archivo General de Simancas [8].

Posterior a *Jerónimo de Ayanz y Beaumont*, en el año 1665, el *II Marqués de Worcester, Edward Somerset (1601 – 1667)* simplificó la máquina de vapor de *Ayanz*, con el propósito de elevar agua a los pisos superiores del *castillo Rawlan*, cerca de *Londres*. El invento de *Somerset* consistía en los mismos elementos que los de *Ayanz*, con la excepción de que utilizaba un único depósito en lugar de dos (Figura 5). Debido a esta gran similitud entre los dos inventos y a que *Somerset* lo incluyera en su libro *“The Century of Inventions”* [10], que trata de una recopilación de inventos de su época, es sabido que *Somerset* sabía del invento de *Ayanz* y se basó en este para confeccionar su máquina [6].

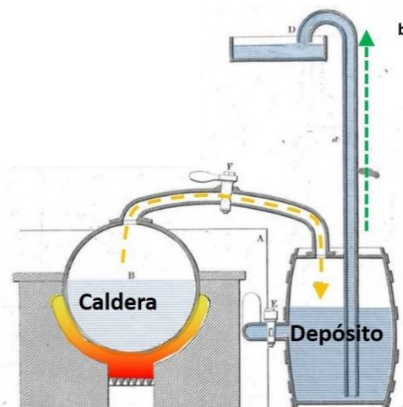


Figura 5: Esquema que muestra el funcionamiento de la máquina de vapor de Somerset [6].

Del mismo modo que *Somerset* se basó en la máquina de vapor de *Ayanz* para concebir la suya, el ingeniero-militar inglés *Thomas Savery (1650 – 1715)* se basó en la máquina de vapor de *Somerset* para idear su conocida *“Amiga del Minero”* (Figura 6). Esta máquina fue patentada en el año 1698, publicada en el año 1705 y utilizada para desagüar agua de una mina, lo cual coincide con la aplicación que le otorgó *Ayanz* a su máquina [11].

El principio de funcionamiento del invento de *Savery* es parecido al de *Ayanz* y al de *Somerset*, en cuanto a que el vapor producido en la caldera empuja el agua en un depósito a través de una tubería ascendente, pero *Savery* se percató de que era posible colocar la caldera y el depósito por encima del agua que había que bombear fuera del pozo (en lugar de por debajo, como hizo *Ayanz*), si aprovechaba el efecto de vacío que se produce al condensar el vapor. De hecho, la principal mejora que tiene esta máquina, respecto a la de *Ayanz*, es que la caldera y el depósito eran mucho más fáciles de instalar, ya que estos se colocaban fuera de la mina, en vez de dentro.

Sin embargo, esta máquina tenía el inconveniente de que utilizaba vapor a una presión tan elevada que existía un alto riesgo de explosiones. Por ello, la utilización de esta máquina fue escasa. Además, otro inconveniente de la máquina es que su rendimiento era extremadamente bajo, al tener que enfriar el depósito en cada ciclo. Este último inconveniente será crucial para el desarrollo de futuras máquinas de vapor [12].



Figura 6: Esquema que muestra el funcionamiento de la máquina de vapor de Savery [6].

En el año 1707; el físico, inventor y médico francés, *Denis Papin* (1647 – 1712), presentaba su “Nueva manera de elevar el agua por la fuerza del fuego” (Figura 7). Esta máquina fue la primera que utilizó un pistón hueco y un cilindro; dos elementos, que como se verá más adelante, son de crucial importancia para las siguientes máquinas de vapor que se inventaron. El propósito del pistón era separar el vapor de la masa de agua, ya que se sabía que esto supondría una mejora en el rendimiento termodinámico.

Papin era consciente de la ineficiencia de la máquina de *Savery*. Es por ello que, a parte de la introducción del pistón, *Papin* diseñó su máquina con la intención de no tener que condensar el vapor en ningún momento del ciclo de operación. Para lograrlo, utilizó una llave de escape por la que salía el vapor del cilindro a la atmósfera, aspirando así el agua proveniente de la mina desagüada.

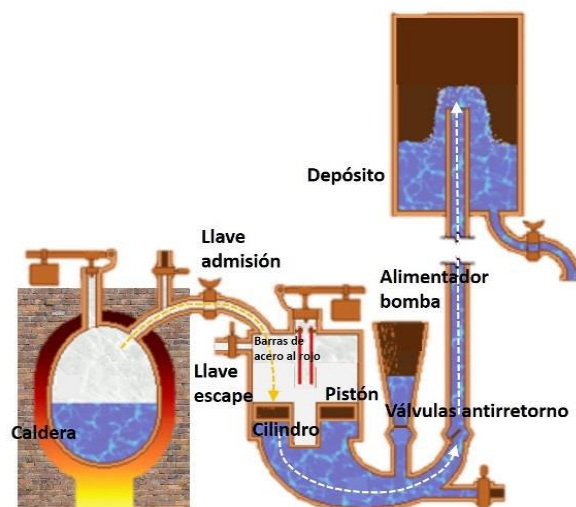


Figura 7: Esquema que muestra el funcionamiento de la máquina de vapor de Papin [6].

El riesgo de explosión de la máquina de *Savery* fue solucionado por el ingeniero y ferretero inglés, *Thomas Newcomen* (1663 – 1729), al diseñar y construir su “Máquina de Vapor Atmosférica” (Figura 9) en el año 1712, para el desagüe de una mina de carbón en el *Castillo de Dudley*, en *Staffordshire*. Aunque el autor principal de esta máquina sea *Newcomen*, este tuvo que asociarse con *Savery* para poder desarrollar su máquina, ya que su patente seguía vigente hasta el año 1733.

Esta máquina fue mejor que la de *Savery* y que la de *Papin*, debido a que utilizaba la presión del vapor generado para desplazar el pistón hacia arriba, en el interior de un cilindro, y la presión atmosférica del aire para forzarlo hacia abajo, en lugar de utilizar el vapor para desplazar el agua dentro del cilindro. Es decir, se consiguió reducir la cantidad de masa que había que desplazar en el interior del cilindro. Además, esta máquina era capaz de mover una bomba, siendo así la primera en elevar cargas mayores a la del agua.

Sin embargo, para que la presión atmosférica fuese capaz de desplazar el pistón hacia abajo, había que reducir la presión del interior del cilindro y, para conseguirlo, esta máquina seguía utilizando el principio de condensación del vapor para generar un vacío, lo cual hacía que la *máquina de fuego y aire* de *Newcomen* (así fue denominada por él) fuese extremadamente ineficiente. Esto se conocía en la época ya que se necesitaba una cantidad de carbón desmesurada para la pequeña cantidad de trabajo, las bajas velocidades y desplazamientos intermitentes que se podían observar.

Además, la muy baja precisión de los métodos de fabricación de los elementos que componen la máquina (como el cilindro) hacía que esta ineficiencia se acrecentase más. Este problema de la máquina de *Newcomen* fue solucionado durante los siguientes años gracias a las mejoras en los métodos de fabricación de varios inventores. Por ejemplo, el inglés *John Smeaton* (1724 – 1792) diseñó un prototipo de la *mandrinadora*, lo que mejoró la precisión y el acabado superficial del interior del cilindro de la máquina de vapor [13].

A pesar de la alta ineficiencia de la máquina de *Newcomen*, ésta supuso un antes y un después en la comercialización de las máquinas de vapor, debido a dos razones: primero, la gran mejora que aportó en la extracción de agua de las minas y, segundo, la creciente demanda de explotaciones mineras. En la Figura 8 se puede observar el incremento en la cantidad de máquinas de vapor fabricadas, tras la primera máquina de *Newcomen*.

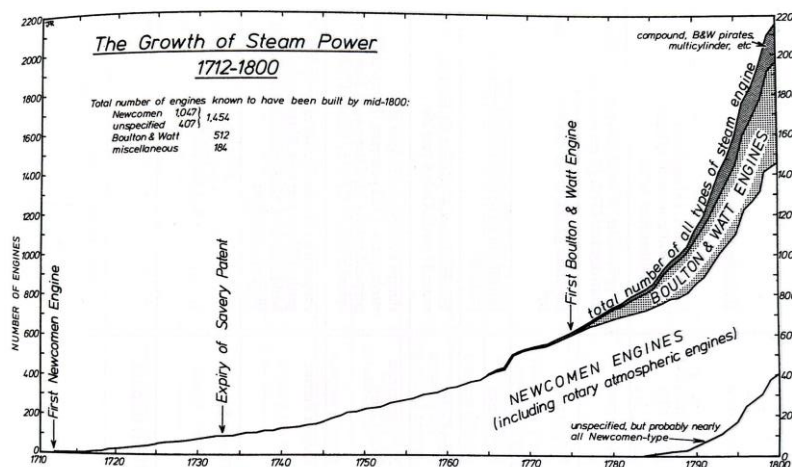


Figura 8: Gráfico cumulativo de la cantidad de máquinas de vapor de Newcomen y de Watt fabricadas en Gran Bretaña [14].

Como se puede observar en la gráfica superior, la máquina de *Newcomen* tuvo un gran éxito y, además, perduró durante muchos años. Incluso después de su muerte, varios inventores continuaron añadiendo pequeñas mejoras que incidieron en el rendimiento de la máquina, pero de forma muy leve.

No fue hasta los primeros años de la Revolución Industrial cuando el ingeniero escocés, *James Watt* (1736 – 1819) dio el paso definitivo en la mejora de la máquina de vapor. Entre otras labores, *Watt* se encargaba del mantenimiento de las máquinas de *Newcomen* en la *Universidad de Glasgow* y, después de una conferencia que impartió el célebre físico-químico *Joseph Black*, considerado el padre de la calorimetría, en la cual éste explicó las principales pérdidas energéticas que sufría dicha máquina, *Watt* realizó una serie de modificaciones que mejoraron el rendimiento de la máquina *Newcomen* muy notablemente.

Nótese aquí que *James Watt* es considerado como el inventor de la máquina de vapor, hito que dio un empuje definitivo a la *Revolución Industrial* y, por ende, sea el que tenga un mayor reconocimiento popular respecto al invento de la máquina de vapor. Sin embargo, al estudiar la historia de la máquina de vapor, uno se percató de que este invento de *Watt* realmente fue una mejora y culminación de estudios e inventos anteriores a él. De hecho, esto es fácilmente perceptible al observar el título otorgado por *Watt* a la patente de su máquina de vapor: “*Un nuevo método para reducir el consumo de vapor y combustible en las máquinas de fuego*” (recuérdese que “*máquina de fuego*” es el nombre dado por *Newcomen* a su máquina) [15].

Dicha patente, la cual se adjunta en el Anexo VII, fue publicada en el año 1769 y constaba de siete puntos; cada uno explicando un cambio que realizaba respecto a la máquina de *Newcomen*. Los puntos de mayor relevancia, dado que fueron los que tuvieron un mayor efecto en el rendimiento de la máquina de vapor son los siguientes (Figura 17):

1. Rodear el cilindro por una *camisa térmica llena de vapor*, que mantuviese el calor en el interior del cilindro durante todo el tiempo de operación de la máquina y que dicha camisa estuviese hecha de un material aislante, para que el calor no fuese transferido de la camisa a la atmósfera.
2. Realizar la condensación del vapor fuera del cilindro, en un *condensador*; y que este estuviese, como mínimo, a la misma temperatura que la del aire que rodease el condensador, durante todo el tiempo de operación de la máquina. Para conseguir las bajas temperaturas en el condensador, éste fue sumergido en una bañera de agua fría.
3. Extraer el vapor que no se terminase de condensar en el condensador, mediante una bomba de vacío.
4. Cerrar el extremo superior del cilindro y, así, usar el vapor generado en la caldera para empujar el pistón hacia abajo, en lugar de usar la presión atmosférica, durante el recorrido de descenso del pistón.

Los cambios introducidos por *Watt* resultaron en una mejora de cuatro veces en la potencia de la máquina de vapor de *Newcomen*. Aun así, la máquina de *Watt* no fue comercializable hasta pasado un tiempo desde que fuese patentada. Los métodos de fabricación de aquellos años no eran lo suficientemente sofisticados como para producir la máquina con la precisión y rapidez deseada. Sin embargo, la suerte de *Watt* empezó a cambiar cuando su socio, el industrial *John Roebuck* (1718 – 1794), debido a dificultades económicas, vendió su parte de la patente a otro gran industrial, *Matthew Boulton* (1728 – 1809), en el año 1772. Posteriormente, en el año 1775 se funda la empresa “*Boulton & Watt*”.

Gracias a los perfeccionamientos de los métodos de fabricación (como el de la *mandrinadora* de *John Smeaton*) y a la alta capacidad productiva de las fábricas de *Boulton*, la máquina de vapor de *James Watt* se vendió con gran éxito en la industria minera [6].

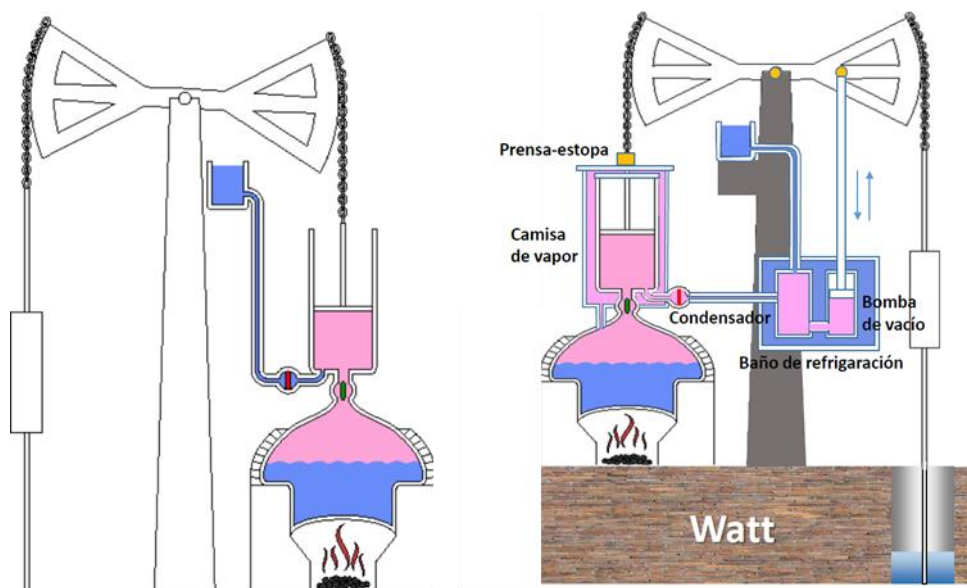


Figura 9: Comparación entre las máquinas de vapor de Thomas Newcomen (izquierda) y de James Watt (derecha) [6].

A pesar de ello, las ambiciones de *Watt* y *Boulton* iban más allá de dominar la industria minera. Deseaban poder expandir la aplicación de su máquina de vapor a cuantas industrias fuese posible y, así, nació la “*Máquina de Vapor Rotativa*”.

En el año 1781, *James Watt* registró su segunda patente relativa a la máquina de vapor, titulada “*Algunos nuevos métodos de aplicar el movimiento oscilante del vapor o de las máquinas de fuego para producir un movimiento rotatorio o circular continuo sobre un eje o centro y, así, darles movimiento a las ruedas de los molinos u otras máquinas*” [16], la cual se adjunta en el Anexo VIII. Dicha patente incluía múltiples sistemas de conversión del movimiento lineal a uno rotatorio, entre los cuales se encuentra el *mecanismo sol-planeta* (Figura 10), inventado por el ingeniero escocés, *William Murdoch* (1754 – 1839). Éste fue empleado de la empresa *Boulton & Watt* hasta el año 1810, cuando se convirtió en el tercer propietario de la misma [17].

La compañía *Boulton & Watt* continuó realizando diversas modificaciones para mejorar el funcionamiento y rendimiento de la máquina. Por ejemplo, incorporó el *regulador centrífugo* (Figura 10), para controlar las sobrepresiones que se podrían generar durante el funcionamiento de la máquina, asegurando así una velocidad constante de la misma durante toda su operación.

Posteriormente, se eliminó el balancín y se incluyó un *volante de inercia* (Figura 11), lo cual permitió eliminar los puntos muertos superior e inferior de las carreras del pistón y reducir considerablemente el tamaño y peso de la máquina. Además, la empresa llegó a fabricar máquinas de vapor que utilizaban el *mecanismo biela-manivela* como forma de convertir el movimiento lineal del pistón a un movimiento rotatorio, cosa que no hizo con anterioridad debido a que dicho mecanismo estaba patentado y no deseaban abonar el dinero necesario para obtener los derechos de explotación del mismo.

Una de las últimas mejoras más notables de la empresa fue la de mejorar la cinemática de la máquina al alinear el pistón con un *mecanismo de cuatro barras*, consiguiendo así un movimiento más rectilíneo que en anteriores máquinas de vapor [17].

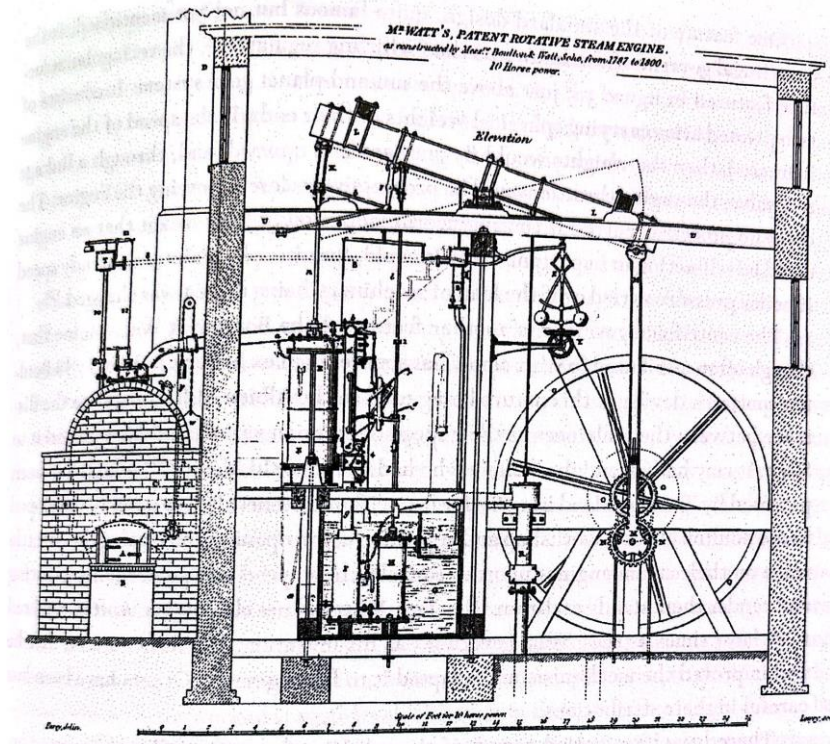


Figura 10: Esquema de la máquina de vapor rotativa patentada por Watt, con la configuración sol-planeta y el regulador centrífugo [17].

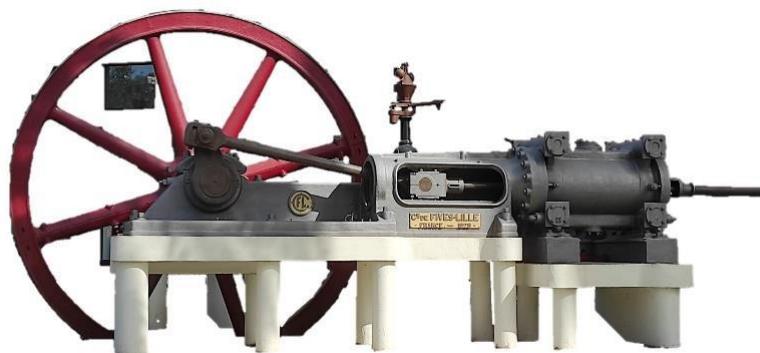


Figura 11: Configuración perfeccionada de la máquina de vapor rotativa de Watt, con el volante de inercia, el mecanismo biela-manivela y el mecanismo de cuatro barras [6].

Llegados a este punto en la evolución de la máquina de vapor, para continuar su desarrollo y mejora era crucial dar un paso importante: el de utilizar vapor de alta presión. Esto haría que las máquinas de vapor tuviesen una mayor relación potencia-peso, haciéndolas prácticas para los medios de transporte de la época (carruajes y botes), puesto que las máquinas de vapor de baja presión no eran capaces de proporcionar la potencia suficiente como para mover la masa que suponía el carruaje, la carga a transportar y la propia máquina en su conjunto.

Sin embargo, dicho paso no se dio hasta el año 1804, cuando la patente de *Watt* expiró, puesto que éste se opuso al desarrollo de esta tecnología [6]. Así, frustró la explotación de la primera *máquina de vapor de alta presión*, inventada en el año 1781 por *Jonathan Hornblower* (1773 – 1815), alegando que dicho invento infringía su patente. La máquina de *Hornblower* fue, además, la primera *máquina de vapor compuesta*, ya que el vapor se expandía en dos fases; primero, en un cilindro a alta presión, parcialmente, y, después, se terminaba de expandir en un cilindro a baja presión (Figura 12). Este invento mejoró el rendimiento y redujo el tamaño de los condensadores, respecto al de *Watt*.

En el año 1804, una vez expirada la patente de *Watt*, el ingeniero inglés, *Arthur Woolf* (1766 – 1837), reintrodujo la máquina de vapor compuesta (Figura 12), la cual mejoró mediante *cilindros múltiples*.

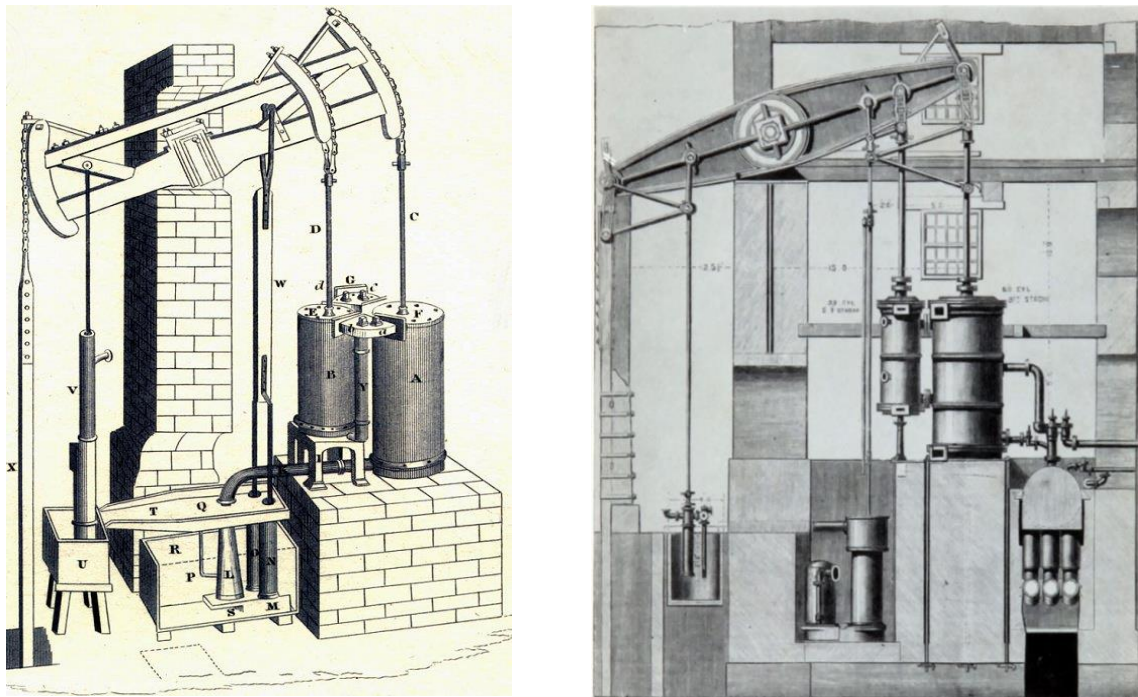


Figura 12: Dibujos de las máquinas de vapor a alta presión compuesta de Jonathan Hornblower [18] (izquierda) y de Arthur Woolf [19] (derecha).

Finalmente, también en el año 1804, el inventor e ingeniero inglés, *Richard Trevithick* (1771 – 1833), desarrolla la primera *locomotora de vapor* capaz de funcionar, en Reino Unido (Figura 13), mientras que el ingeniero norteamericano, *Oliver Evans* (1755 – 1819), construye el primer carruaje anfibia de Estados Unidos impulsado por una máquina de vapor (Figura 14), dando así inicio a los grandes avances que se dieron en los métodos de transporte, durante el transcurso de la *Revolución Industrial*.

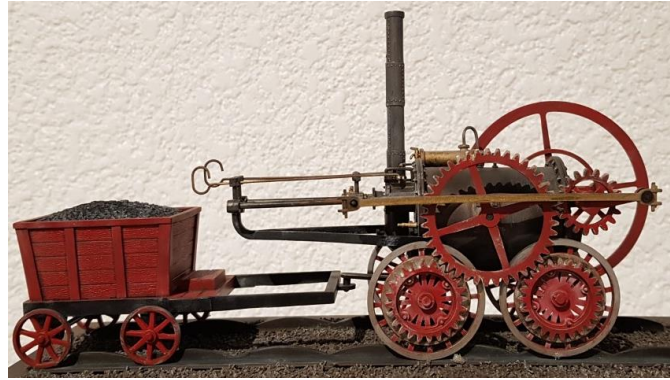


Figura 13: Maqueta de la primera locomotora funcional, de Richard Trevithick, expuesta en la Casa de la Cultura de Nuevo León [20].

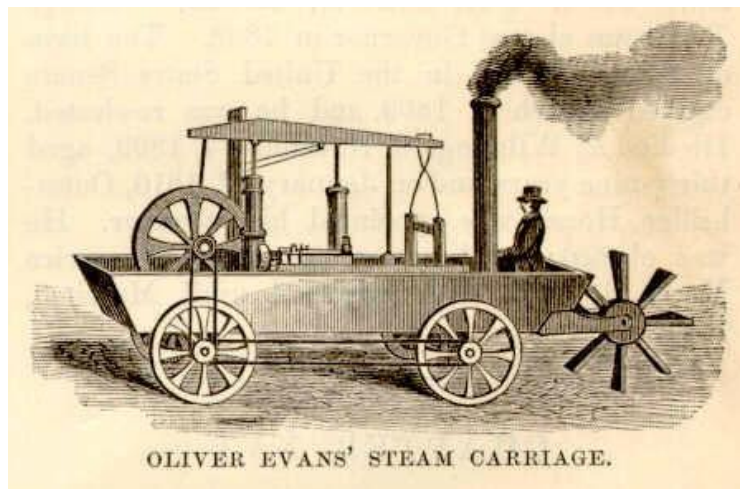


Figura 14: Dibujo del carruaje anfibia de Oliver Evans. Como se puede observar, se trata de una mezcla de vehículo terrestre y bote acuático [21].

3.3. Historia del desarrollo de la máquina de vapor. Línea del Tiempo.

A continuación, en la Figura 15, se presenta una línea temporal, aproximadamente a escala, del desarrollo de la máquina de vapor, desde el invento del cañón de vapor; el *Architronito* de *Arquímedes de Siracusa* hasta el carruaje anfibia de *Oliver Evans*. El propósito principal de dicha línea del tiempo es el de tener una mayor comprensión temporal de la evolución de los inventos de la energía del vapor. Además, se ha dividido dicha línea temporal en las diferentes épocas de la historia más importantes para el desarrollo de la máquina de vapor y se han agrupado de la forma más pertinente posible, con el objetivo de demostrar los diferentes contextos históricos en los que se produjeron cada desarrollo.

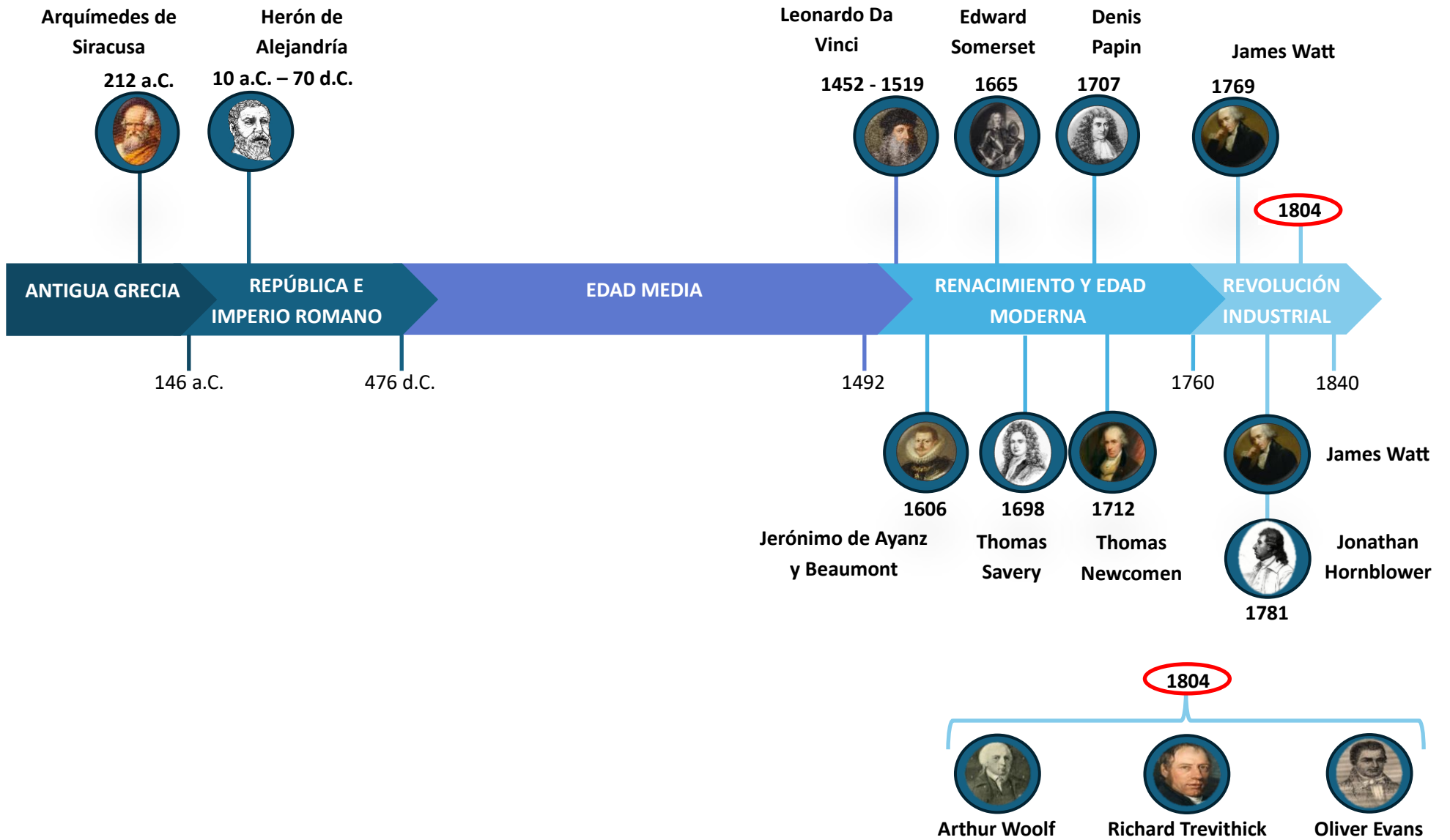


Figura 15: Línea del tiempo mostrando los años en los que se realizaron avances en la tecnología del vapor, las épocas de la historia en las que se dieron y los nombres junto con una ilustración de los personajes históricos responsables de dichos avances.

4. Preparativos para el modelado digital de las máquinas de vapor.

Una vez investigada la historia de los desarrollos de la máquina de vapor, se determina para cual(es) de ella(s) se procede a realizar su modelo digital para su inclusión en el *Museo Virtual de la Escuela de Ingenierías Industriales (EII) de la Universidad de Málaga (UMA)*. Posteriormente, es primordial encontrar una serie de dibujos, planos u otras fuentes de información en las cuales se muestren lo más detallada y fielmente posible la(s) máquina(s) a modelar. Además, se debe elegir un programa de *Diseño Asistido por Ordenador (CAD)*, por sus siglas en inglés), que se ajuste a las necesidades del presente trabajo.

4.1. Selección de las máquinas de vapor a modelar.

Para el presente trabajo, se ha decidido realizar los modelos digitales de dos máquinas de vapor diferentes: primero, la *máquina de vapor atmosférica de Thomas Newcomen* (Figura 16) y, posterior a ésta, la *máquina de vapor de James Watt que mejora el rendimiento térmico de las máquinas de vapor atmosféricas* (Figura 18).

Esta decisión ha sido tomada debido a que la máquina de *Newcomen* supuso un antes y un después en el desarrollo de la máquina de vapor, siendo así la de mayor éxito comercial antes y durante la *Revolución Industrial*, como se expuso con anterioridad en la Figura 8. Por lo tanto, dado a su reconocimiento como una de las máquinas de mayor importancia (si no la de mayor importancia) de la *Revolución Industrial*, resulta de gran interés su inclusión en el *Museo Virtual de la EII de la UMA*.

Además, se ha decidido modelar también la máquina de vapor de *Watt* debido a que es interesante mostrar las mejoras térmicas que supuso cada elemento añadido a la máquina de *Newcomen*. Aquí es importante destacar que, en este trabajo, el objetivo de dicho modelo es únicamente el de mostrar cada uno de los elementos que *Watt* añadió a la máquina de *Newcomen* para mejorarla desde un punto de vista puramente térmico. El objetivo del trabajo no es el de obtener un modelo digital lo más fiel posible a la máquina de *Watt*, como sí es el caso para la máquina de *Newcomen*.

4.2. Búsqueda bibliográfica de las máquinas de vapor de Newcomen y Watt.

Para poder realizar un modelo digital de la *máquina de vapor de Newcomen* que represente de la forma más fiel posible la máquina real que se construyó, es de vital importancia recabar información acerca de los siguientes aspectos:

- *Geometrías* de cada una de las piezas que componen la máquina.
- *Medidas* de las piezas.
- *Materiales* de los que estaban hechas cada una de las piezas.
- *Descripciones de la funcionalidad* de la máquina.

La primera fuente documental en la que se pensó para recabar dicha información fue la de las *patentes*, debido a su fiabilidad, en cuanto a que éstas son elaboradas por los propios autores de las máquinas. Aunque ésta fue una buena opción para la máquina de vapor de *James Watt* [15] (Figura 17), no lo fue para la de *Thomas Newcomen*, puesto que esta máquina no fue patentada, debido a la patente de *Savery* todavía vigente.

Posteriormente, se halló el libro de *LTC Rolt* y *JS Allen*, “*The Steam Engine of Thomas Newcomen (La máquina de vapor de Thomas Newcomen)*” [14], del cual se obtuvo el dibujo de la Figura 16. Éste, dibujado por *Thomas Barney* en el año 1719, muestra la primera máquina de Newcomen que se construyó y que fue instalada en las minas de carbón del *castillo de Dudley*. Debido a ello y a que el dibujo muestra una vista global de la máquina, éste es utilizado para obtener las *geometrías* de los diferentes componentes para el *modelo digital*.

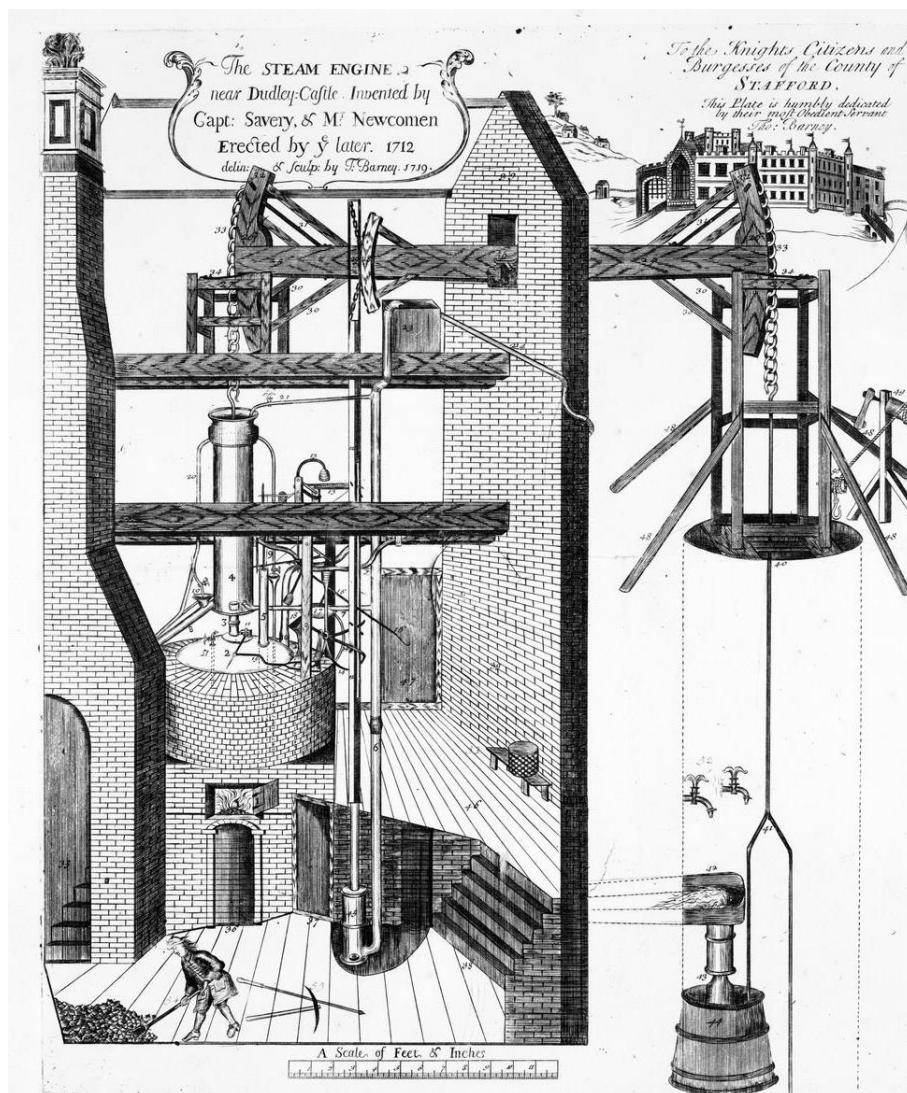


Figura 16: Dibujo de la primera máquina de vapor de Newcomen, instalada en las minas de carbón del castillo de Dudley, realizado por Thomas Barney [14].

Además, el libro de *Rolt* y *Allen* contiene información abundante y detallada de las *medidas* de los componentes principales de la máquina (cilindro y caldera), los *materiales* de gran parte de los elementos que la componen, así como *textos descriptivos que explican detalladamente cómo funcionaba* la máquina.

En cuanto a la *máquina de vapor de James Watt*, la mayor parte de la información acerca del funcionamiento y los materiales de la máquina ha sido recabada directamente de la patente. La Figura 17 muestra un extracto en el que se puede observar cómo está escrita de forma que describe detalladamente los elementos que añade sobre la máquina de Newcomen para mejorar su rendimiento térmico, siendo éstos: la *cámara de calor* que rodea al cilindro, el *condensador* y la *bomba de vacío* del condensador.

2

A.D. 1769.—N° 913.

Watt's Method of Lessening the Consumption of Steam & Fuel in Fire Engines.

following is a particular description of the nature of my said Invention, and of the manner in which the same is to be performed (that is to say) :—

My method of lessening the consumption of steam, and consequently fuel, in fire engines consists of the following principles :—

First, that vessell in which the powers of steam are to be employed to work 5 the engine, which is called the cylinder in common fire engines, and which I call the steam vessell, must during the whole time the engine is at work be kept as hot as the steam that enters it, first, by enclosing it in a case of wood or any other materials that transmit heat slowly; secondly, by surrounding it with steam or other heated bodies; and, thirdly, by suffering neither water 10 or any other substance colder than the steam to enter or touch it during that time.

Secondly, in engines that are to be worked wholly or partially by condensation of steam, the steam is to be condensed in vessells distinct from the steam vessells or cylinders, although occasionally communicating with them. These 15 vessells I call condensers, and whilst the engines are working, these condensers ought at least to be kept as cold as the air in the neighbourhood of the engines by application of water or other cold bodies.

Thirdly, whatever air or other elastic vapour is not condensed by the cold of the condenser, and may impede the working of the engine, is to be drawn 20 out of the steam vessells or condensers, by means of pumps wrought by the engines themselves, or otherwise.

Fourthly, I intend in many cases to employ the expansive force of steam to press on the pistons, or whatever may be used instead of them, in the same manner as the pressure of the atmosphere is now employed in common fire 25 engines. In cases where cold water cannot be had in plenty, the engines may be wrought by this force of steam only, by discharging the steam into the open air after it has done its office.

Fifthly, where motions round an axis are required, I make the steam vessells in form of hollow rings or circular channels, with proper inlets and outlets for 30 the steam, mounted on horizontal axles like the wheels of a water mill; within them are placed a number of valves that suffer any body to go round the channell in one direction only. In these steam vessells are placed weights, so fitted to them as intirely to fill up a part or portion of their channels, yet rendered capable of moving freely in them by the means herein-after mentioned 35 or specified. When the steam is admitted in these engines between these weights and the valves, it acts equally on both, so as to raise the weight to one side of the wheel, and by the reaction on the valves successively to give a circular motion to the wheel, the valves opening in the direction in which the

Figura 17: Extracto de la patente de la máquina de vapor de James Watt, de 1769, en la cual se describe detalladamente los principios funcionales de los elementos que añade sobre las máquinas de vapor de Newcomen, para mejorar su rendimiento térmico [15].

Aparte de la información obtenida de la patente, también era importante encontrar un dibujo en el cual se pudiese observar las geometrías de los elementos descritos en dicho texto para, posteriormente, poder representarlos en el *modelo digital*. Con este propósito ha sido utilizado el dibujo que se muestra en la Figura 18, obtenido del libro de Miller, D.P., “*The life and legend of James Watt (La vida y leyenda de James Watt)*” [17].

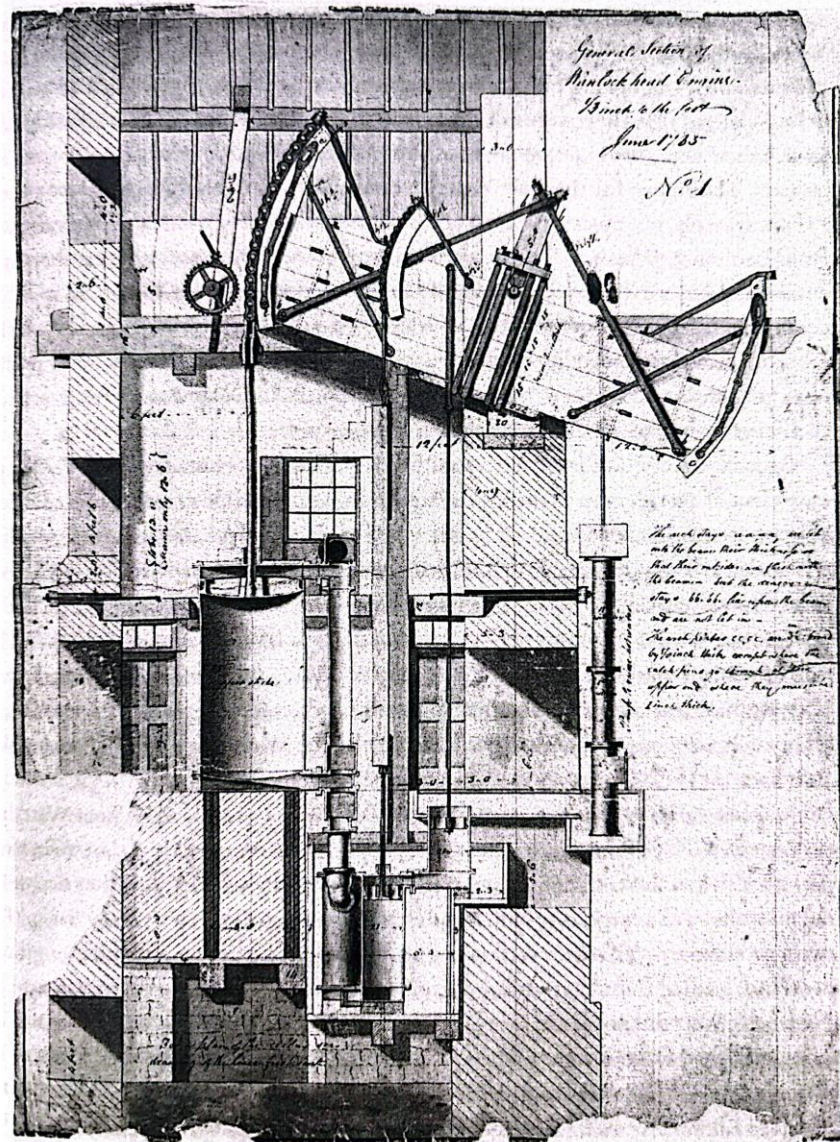


Figura 18: Dibujo de la máquina de vapor de James Watt, patentada en el año 1769, la cual mejora el rendimiento térmico de las máquinas Newcomen [17].

4.3. Elección del software CAD empleado para realizar los modelos digitales de las máquinas.

Ya que se conocen las geometrías de los elementos que componen las máquinas de vapor a modelar, así como el comportamiento general de cada una de ellas, se procedió a investigar los diferentes *programas CAD* disponibles para, posteriormente, escoger el más apropiado para el trabajo a realizar.

A continuación, se listan el *software CAD* que se ha considerado para realizar los *modelos digitales* del presente trabajo:

- **Autodesk AutoCAD:** Herramienta muy potente y ampliamente utilizada para el diseño 2D, sobre todo para planos de arquitectura y de ingeniería. Sin embargo, no es tan buena opción para el diseño 3D, ya que sus funcionalidades son limitadas en comparación con otras herramientas. Por ejemplo, este programa no es capaz de realizar simulaciones estructurales ni análisis de ensamblajes, por lo que no se podría realizar un estudio del movimiento de la máquina.

- **3ds Max:** Aunque sea una solución de modelado digital 3D, este programa está orientado a la industria del entretenimiento, ya que es potente en texturización y animación. No es un programa realmente útil para el modelado digital de diseños mecánicos.

- **CATIA V5:** Una de las herramientas más avanzadas para el diseño de productos complejos y de ingeniería avanzada. También es el programa de *modelado digital* que ofrece la herramienta de modelado de superficies complejas más avanzada. Por ello, es el programa más utilizado en los sectores aeroespacial y automotriz. Debido a su alto coste y a que su interfaz no sea tan cómoda, en comparación con otras herramientas, no es tan utilizado para el diseño de productos fuera de estos dos sectores.

- **SolidWorks:** La solución líder en el diseño y fabricación de maquinaria, debido a su facilidad de uso en la creación de piezas y de ensamblajes, además de ofrecer módulos de simulación estructural y de fluidos, así como una interfaz de usuario cómoda. Aunque ofrezca herramientas de modelado de superficies complejas, CATIA le supera en este aspecto.

- **NX CAD:** Herramienta popular en las industrias aeroespacial, automotriz y manufactura, con un enfoque en la creación de ensamblajes y simulaciones más avanzados. Sin embargo, no es la más utilizada en el sector automotriz o aeroespacial, puesto que CATIA ofrece una herramienta de modelado de superficies avanzadas más potente. Además, tampoco es la más popular en la industria manufacturera de maquinaria, debido a que este software requiere unos recursos computacionales avanzados y licencias más costosas, en comparación con SolidWorks.

- **SolidEdge:** Es una solución muy válida para el diseño de piezas y ensamblajes para la fabricación de maquinaria. También contiene módulos de simulación estructural. Además, ofrece una interfaz fácil de utilizar. A pesar de que sea una herramienta que ofrece unas prestaciones muy similares a las de SolidWorks, aquella es algo más popular en el diseño de maquinaria.

Habiendo expuesto los distintos *programas CAD*, explicando su utilidad en diferentes aplicaciones industriales, dados sus puntos fuertes y débiles, se concluyó que las mejores soluciones a adoptar eran *SolidWorks* o *SolidEdge*, puesto que éstas son de mayor utilidad para el diseño de maquinaria de no excesiva complejidad (como para la que sí sería de mayor interés soluciones como *CATIA* o *NX CAD*). Además, tanto *SolidWorks* como *SolidEdge* ofrecen módulos de simulación estructural, lo cual será necesario para el estudio estructural (desarrollado en el Capítulo 8 de la presente memoria).

Finalmente, se optó por utilizar el programa *SolidWorks* (Figura 19), debido a la alta familiaridad con este programa por parte del autor de los *modelos digitales* de las máquinas de vapor a modelar, además de que este programa se ajusta mejor a las necesidades de modelado de éstas.



Figura 19: Logotipo del software SolidWorks, de la empresa francesa, Dassault Systèmes [22].

5. Modelado digital de las máquinas de vapor de Newcomen y de Watt.

Una vez cumplidos estos trabajos preparatorios para el modelado, se procede a realizar, en el programa *CAD* elegido, el modelado digital de las máquinas de vapor seleccionadas, el cual será basado en la información obtenida de los dibujos, planos o textos descriptivos de las mismas con el objetivo de que sea lo más fiel posible a la máquina real.

El procedimiento que se ha seguido para alcanzar estos *modelos digitales* se puede resumir en las siguientes cinco fases, las cuales fueron realizadas en el orden aquí expuesto:

1. División de las máquinas en diferentes grupos funcionales para la posterior subdivisión del ensamblaje CAD en sub-ensamblajes.
2. Adopción de una nomenclatura de los archivos CAD para su efectiva organización.
3. Adaptación de los dibujos bidimensionales al entorno CAD tridimensional.
4. Realización de las piezas y ensamblajes CAD de la máquina de Newcomen.
5. Realización de las piezas CAD adicionales de la máquina de Watt y superposición de éstas sobre el modelo de la máquina de Newcomen.

El objetivo principal de establecer este procedimiento es el de seguir unas pautas claras para alcanzar una *Metodología del Diseño* efectiva y eficiente. Además, este procedimiento que se ha seguido es estándar dentro de la industria del diseño mecánico de maquinaria. En el Apartado 5.5 se puede consultar un esquema del procedimiento que se ha seguido durante el diseño de las máquinas, el cual facilita la comprensión visual de dicho proceso.

5.1. División de las máquinas en grupos funcionales.

Esta fase comienza antes de modelar ninguna de las piezas que conforman el modelo digital y se trata de una praxis bien establecida en los trabajos de diseño de maquinaria. Su propósito es el de establecer una estructura clara de cómo se va a modelar la máquina, para que el diseño adquiera una organización que se vuelve cada vez más necesaria conforme el número de archivos CAD del proyecto aumenta.

Además de facilitar la búsqueda de un cierto archivo CAD dentro de la biblioteca de archivos del proyecto (Anexos I a IV), esta división de la máquina en grupos funcionales permite una mayor facilidad en la comprensión del funcionamiento general de la máquina, así como de los distintos elementos que la componen.

Aparte de la utilidad general de esta *metodología de diseño* en el modelado digital de maquinaria, ésta cumple un propósito específico en este proyecto: facilitar la incorporación del modelo de la máquina realizado en *SolidWorks*, al *Museo Virtual* de la *EII* de la *UMA*. Esto es así, puesto que, cuando se realice la implementación de la máquina al *museo virtual*, por parte del responsable de dicha tarea, éste agrupará cada pieza en diferentes “bloques de piezas”, con el propósito de que cada “bloque” tenga un movimiento definido. Es decir, todas las piezas dentro de un bloque se moverán juntas como un único sólido. Por lo tanto, que el responsable de la implementación del modelo *SolidWorks* al *museo virtual* lo obtenga desglosado por grupos funcionales (sub-ensamblajes) le facilita en gran medida la tarea de qué piezas incluir en cada

“bloque”. Además, esta agrupación reducirá considerablemente la complejidad y el peso del archivo CAD de la máquina que se importará al *Museo Virtual*.

5.1.1. Grupos funcionales establecidos para la máquina de Newcomen.

A continuación, se desglosan los distintos grupos funcionales en los que se ha dividido la máquina de vapor de Newcomen, cuyos ensamblajes a los que han sido asociados cada uno pueden ser observados, en el mismo orden, en el Anexo I y II:

1. *Cilindro Principal*
2. *Caldera*
3. *Edificio* en la que se instala la máquina
4. *Viga Elevadora*
5. *Bomba Hidráulica* del interior del edificio
6. *Válvula de Vapor*
7. *Válvula de Inyección* de agua en el cilindro principal
8. *Tubería Maestra y Ramas* que van al cilindro
9. *Tubería de Desagüe* del *Depósito Superior*
10. *Tubería de Recirculación* entre el cilindro principal y la caldera
11. *Tubería de Desagüe* del cilindro principal
12. *Elementos Externos* al edificio
13. *Cadena* entre la viga elevadora y el pistón del cilindro principal
14. *Cadena* entre el vástago principal de la bomba de la mina y la viga elevadora
15. *Cadena Inferior* entre la viga elevadora y el vástago de la bomba hidráulica del interior del edificio
16. *Cadena Superior* entre la viga elevadora y el vástago de la bomba hidráulica del interior del edificio

Cada uno de estos grupos funcionales pueden observarse, agrupados en el conjunto global de la máquina, en las Figura 66 a 69, además de por separado, como ensamblajes independientes, en las Figura 32 a 64.

5.1.2. Grupos funcionales establecidos para la máquina de Watt.

A continuación, se desglosan los distintos grupos funcionales en los que se ha dividido la máquina de vapor de Watt, cuyos ensamblajes a los que han sido asociados cada uno pueden ser observados, en el mismo orden, en el Anexo III y IV:

1. *Cilindro Principal*, con cerramiento superior y encapsulamiento por camisa térmica
2. *Caldera*
3. *Edificio* en la que se instala la máquina
4. *Viga Elevadora*
5. *Bomba Hidráulica* del interior del edificio
6. *Condensador*
7. *Válvula de Vapor*
8. *Tubería Maestra y Ramas* que van al cilindro
9. *Tubería de Desagüe* del *Depósito Superior*
10. *Tubería de Entrada de Vapor* a la parte superior del cilindro

11. *Elementos Externos* al edificio
12. *Cadena* entre la viga elevadora y el pistón del cilindro principal
13. *Cadena* entre el vástago principal de la mina y la viga elevadora
14. *Cadena Inferior* entre la viga elevadora y el vástago de la bomba hidráulica del interior del edificio
15. *Cadena Superior* entre la viga elevadora y el vástago de la bomba hidráulica del interior del edificio
16. *Tubería de Salida de Vapor* de la parte superior del cilindro principal al condensador
17. *Tubería de Salida de Vapor* de la parte inferior del cilindro principal al condensador

Como se puede observar, la mayoría de los grupos funcionales de la *máquina de Watt* coinciden con los de la *máquina de Newcomen*. Esto es así, puesto que el modelo de la *máquina de Watt* consiste únicamente en la superposición de los elementos que se añadieron para mejorar el rendimiento térmico, sobre el modelo realizado de la *máquina de Newcomen*.

Cada uno de estos grupos funcionales pueden observarse, agrupados en el conjunto global de la máquina, en las Figura 80 a 83. Además, los grupos funcionales de la *máquina de Watt* y que no coinciden con los de la *máquina de Newcomen*, pueden observarse por separado, como ensamblajes independientes, en las Figura 71 a 79.

5.2. Adopción de una nomenclatura organizativa para los archivos CAD.

Puesto que el modelo digital de cada máquina de vapor consistirá en una gran cantidad de archivos, es muy conveniente establecer un sistema de nombramiento de los archivos CAD coherente; uno que ordene las piezas, primero, por grupo funcional y, luego, por orden de importancia dentro de cada grupo funcional. Esto permite una ágil navegación de la biblioteca CAD, ya que será más fácil y rápido encontrar un archivo CAD específico, en comparación con el caso en el que no se establezca ningún tipo de sistema de nomenclatura.

Por todo ello, para este trabajo se ha establecido la nomenclatura organizativa de la biblioteca de archivos CAD que se expone a continuación. Para una mayor comprensión de este sistema, en los Anexos I y II, para la máquina de *Newcomen*, y en los Anexos III y IV, para la máquina de Watt, se pueden observar las bibliotecas completas resultantes.

TFM – MV – NW/WT_XX – XX – XX_PART/ASSY – NombreDeLaPieza/EnsamblajeDiseñada

Donde:

1. **TFM** indica que el archivo CAD pertenece al **Trabajo Final de Master**.
2. **MV** es el acrónimo para **Máquina de Vapor**.

3. **NW/WT** indica si el archivo CAD pertenece al modelo de la máquina de vapor de **Newcomen** o al de la máquina de vapor de **Watt**.
4. **XX-XX-XX** es el **sistema de numeración** de las **piezas** y **ensamblajes**. De izquierda a derecha, las **primeras dos cifras** indican si el modelo es el de la **versión con apariencias reales (01)** o la **versión de la demostración funcional (02)** (esto se explica más en detalle en el Capítulo 7). Las **siguientes dos cifras** indican el **sub-ensamblaje** (grupo funcional) al que pertenece el archivo CAD. Las **últimas dos cifras** indican el **número de pieza** perteneciente al sub-ensamblaje indicado por las dos cifras anteriores.
5. **PART/ASSY** indica si el archivo CAD trata de una **pieza** o de un **ensamblaje**.
6. Por último, se le otorga un **nombre** coherente a la **pieza** o **ensamblaje** diseñado en ese archivo CAD.

5.3. Adaptación de los dibujos bidimensionales de la máquina Newcomen al entorno CAD tridimensional.

Para recrear la *máquina de Newcomen* de forma correcta en *SolidWorks*, es necesario conocer las **medidas reales de los elementos** que la componen. Puesto que no se ha dispuesto de ninguna serie de dibujos o planos de los que se hayan podido extraer estas medidas de forma sencilla y directa, se ha procedido de la siguiente manera.

Primero, era necesario obtener, al menos, una medida real de uno de los elementos principales de la máquina y que son observables en el dibujo de la Figura 16. En el libro de *LTC Rolt y JS Allen*[14] se encontró la información de que el **cilindro principal** de la máquina medía **21 pulgadas de diámetro y 7 pies y 10 pulgadas de altura**. Luego, convirtiendo estas medidas del *sistema de unidades Imperial Británico* al *Sistema Internacional de Unidades*, de ahora en adelante *SI*, obtenemos las siguientes medidas:

$$\text{Diámetro Real del Cilindro Principal (mm)} = 21 \text{ pulgadas} \cdot 25,4 \frac{\text{mm}}{\text{pulgada}}$$

$$\text{Diámetro Real del Cilindro Principal (mm)} = 533,4 \text{ mm}$$

$$\text{Altura Real del Cilindro Principal (mm)} =$$

$$= \left(7 \text{ pies} \cdot 12 \frac{\text{pulgadas}}{\text{pie}} \right) + 10 \text{ pulgadas}$$

$$= (84 + 10) \text{ pulgadas} = 94 \text{ pulgadas}$$

$$\text{Altura Real del Cilindro Principal (mm)} = 94 \text{ pulgadas} \cdot 25,4 \frac{\text{mm}}{\text{pulgada}}$$

$$= 2387,6 \text{ mm}$$

Conocidas las medidas reales que tenía el cilindro de la máquina a modelar, el siguiente paso consistía en imprimir el dibujo de la Figura 16 para, posteriormente, medir a mano el cilindro en el dibujo impreso. Habiendo realizado la impresión en un formato A3, las **medidas tomadas del dibujo** fueron las siguientes:

$$\text{Diámetro del Cilindro Principal en el dibujo (mm)} = 10 \text{ mm}$$

$$\text{Altura del Cilindro Principal en el dibujo (mm)} = 44,5 \text{ mm}$$

Conocidas tanto las medidas reales como las medidas del dibujo, para el cilindro, se estableció una **escala** entre estas dos:

$$\begin{aligned} \text{Dibujo: Realidad} &= \frac{\text{Diámetro del Cilindro Principal en el dibujo (mm)}}{\text{Diámetro Real del Cilindro Principal (mm)}} \\ &= \frac{10 \text{ mm}}{533,4 \text{ mm}} \end{aligned}$$

$$\text{Dibujo: Realidad} = 1: 53,34$$

Una vez se obtuvo esta escala, se procedió a realizar las mediciones de todos los elementos que conforman la máquina y que sean visibles en el dibujo para, finalmente, obtener las correspondientes medidas reales que tenía cada elemento de la máquina construida. Como ejemplo, se muestra la obtención de las **medidas reales de la viga elevadora** a partir de las medidas tomadas del dibujo:

$$\text{Longitud de la Viga Elevadora en el dibujo (mm)} = 141 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \text{Longitud Real de la Viga Elevadora (mm)} &= 141 \text{ mm} \cdot 53,34 \\ &= 7520,94 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{Altura de la Viga Elevadora en el dibujo (mm)} = 10 \text{ mm}$$

$$\text{Altura Real de la Viga Elevadora (mm)} = 10 \text{ mm} \cdot 53,34 = 533,4 \text{ mm}$$

Por último, es evidente que para poder realizar un modelo digital tridimensional de cada elemento de la máquina que no tenga forma cilíndrica, es necesaria una tercera medida; la de la **anchura**. Sin embargo, esta medida no se puede obtener del dibujo para, prácticamente, ningún elemento. Además, no hay ninguna otra fuente de información que indique esta medida. Por lo tanto, a la hora de realizar el modelo CAD de las piezas en *SolidWorks*, ha habido que asumir un valor para esta medida que otorgue a las piezas una proporcionalidad sensata. Por supuesto, en el caso de los elementos con forma cilíndrica, la pieza CAD puede ser modelada únicamente con las medidas de altura y radio (o diámetro), las cuales sí se pueden medir directamente en el dibujo impreso. Además, cualquier otra medida o elemento completo que no se muestre en el dibujo de la Figura 16, y para el cual no se encuentre ninguna otra fuente de información, ha sido asumida para que sea proporcionalmente coherente con el resto del modelo de la máquina. Este es el caso, por ejemplo, para el interior de la caldera o el pistón de la bomba hidráulica del interior del edificio, entre otros elementos de la máquina.

5.4. Realización de las piezas CAD de la máquina de Newcomen.

La última fase del procedimiento del modelado digital consiste en realizar en *SolidWorks* los modelos de las piezas que componen cada grupo funcional (sub-ensamblaje) de la máquina de vapor (Subapartado 5.1.1.), dando a cada pieza las medidas reales de la misma, obtenidas mediante el cálculo expuesto en el Apartado 5.3., además de otorgando a cada pieza el nombre correspondiente con la nomenclatura de la biblioteca CAD establecida (Apartado 5.2.), a la vez que dichas piezas se ensamblan junto a las demás que pertenecen a cada grupo funcional.

Para explicar de forma ordenada el diseño de las piezas, se procede a dividirlo en tres partes: primero, el diseño de los componentes observables en la Figura 16, segundo, el de los no observables en dicha figura, pero sí en otra fuente de información y, tercero, el de los no observables en esta figura u otra fuente de información.

5.4.1. Diseño de las piezas observables en la figura 16.

El procedimiento que se ha seguido para diseñar estas piezas es exactamente el expuesto en el Apartado 5.3. La mayoría de los elementos que conforman la máquina se han podido modelar siguiendo esta metodología y, por ende, aquí no se van a detallar todas estas piezas, aunque sí se muestra, como ejemplo, el resultado del modelado del *cilindro principal* (Figura 20).

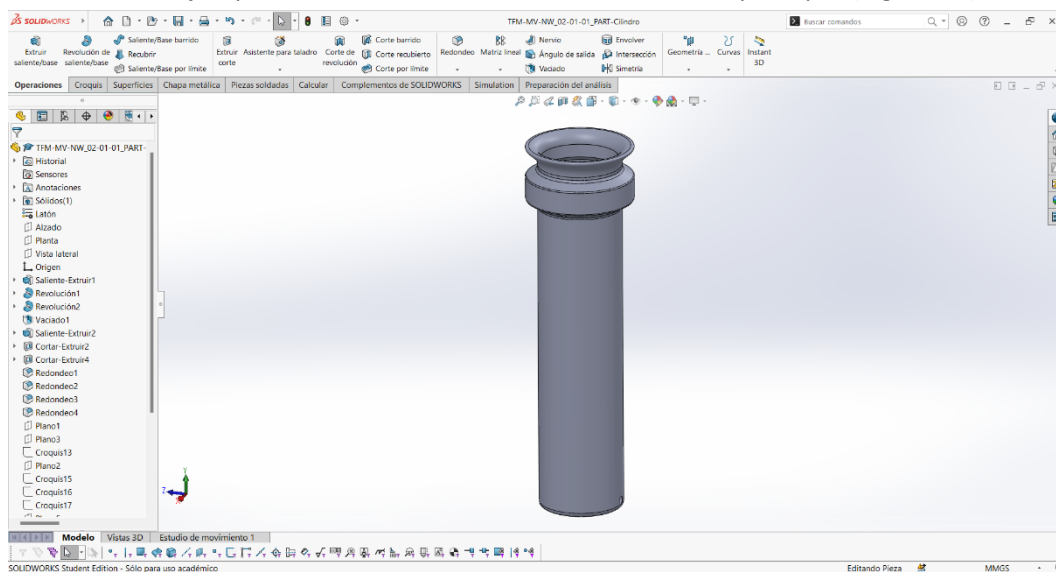


Figura 20: Captura del entorno de diseño de pieza de SolidWorks, en el cual se ha diseñado el cilindro principal de la máquina de Newcomen.

5.4.2. Diseño de las piezas no observables en la figura 16 pero sí en otra fuente de información.

Es evidente que la máquina de Newcomen consiste en más elementos que los observables en la Figura 16. Por lo tanto, si se desea obtener un modelo lo más fiel posible con la realidad, habrá que buscar otras fuentes de información que permitan alcanzar dicho objetivo. A continuación, se exponen todos los conjuntos de elementos de la máquina de Newcomen que pertenecen a esta subcategoría.

Primero, en el libro de *LTC Rolt* y *JS Allen* [14] se encontraron tanto dibujos detallados como esquemas simplificados de las *válvulas de vapor* (Figura 21 y Figura 22) y de *inyección* (Figura 23), así como una fotografía del *pistón del cilindro principal* (Figura 24):

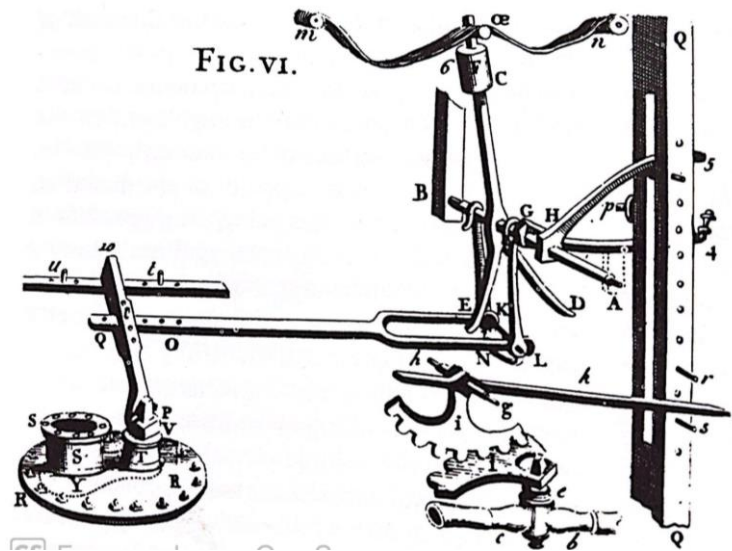


Figura 21: Dibujo detallado de todos los elementos que componen la válvula de vapor de la máquina de Newcomen [14].

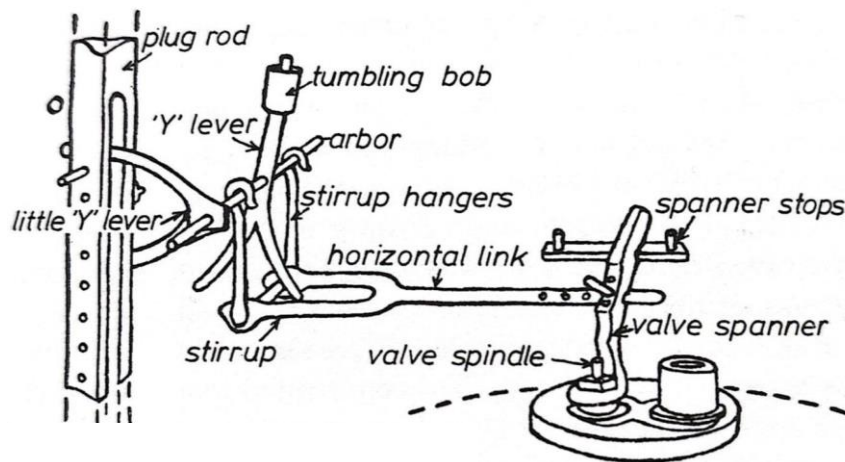


Figura 22: Esquema simplificado de la válvula de vapor de la máquina de Newcomen [14].

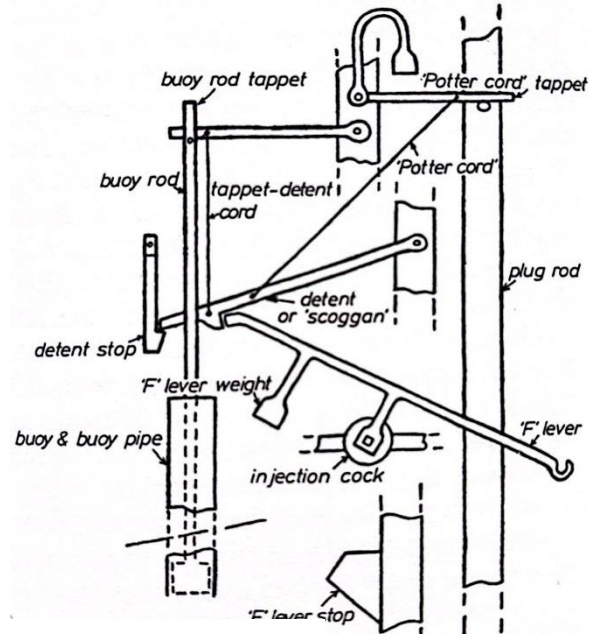


Figura 23: Esquema simplificado de todos los componentes de la válvula de inyección de la máquina de Newcomen [14].

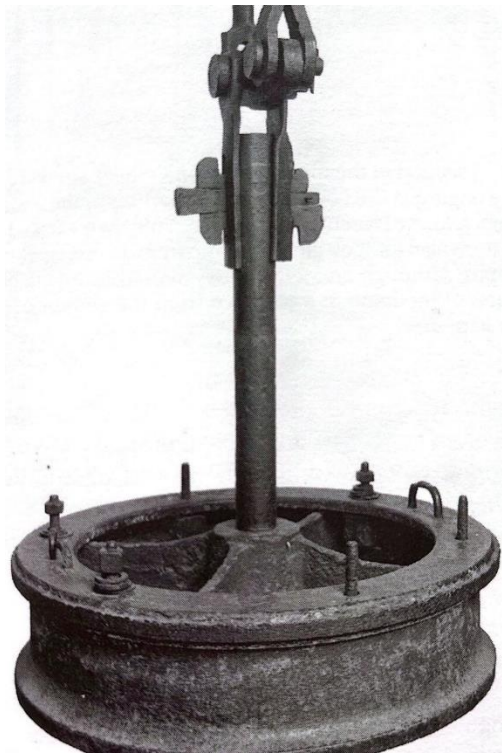


Figura 24: Fotografía incluida en el libro de LTC Rolt y JS Allen de un pistón de la máquina de Newcomen [14].

A continuación, como ejemplo del modelado de, al menos, una de las piezas de cada conjunto mostrado en las Figura 21 a 24, se aportan las siguientes imágenes. Por otro lado, estas piezas pueden observarse en el conjunto al que pertenece cada una, en las Figura 32 a 64.

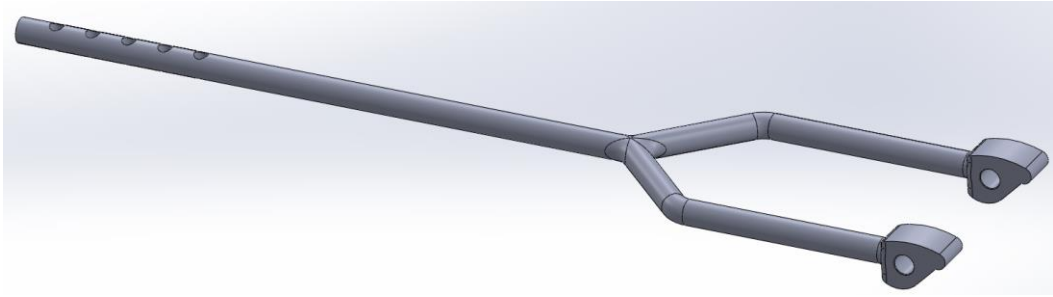


Figura 25: Modelo digital del link horizontal (horizontal link) de la válvula de vapor de la máquina de Newcomen.

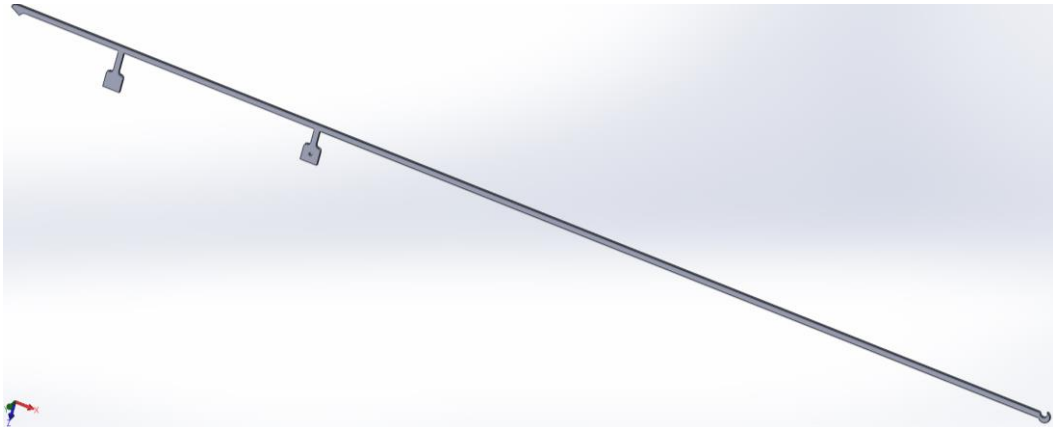


Figura 26: Modelo digital de la palanca F (F lever) de la válvula de inyección de la máquina de Newcomen.

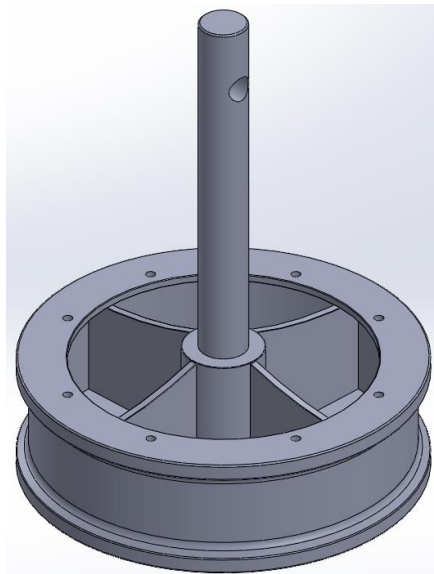


Figura 27: Modelo digital del cuerpo del pistón del cilindro principal de la máquina de Newcomen.

Otro de los elementos del modelo que pertenece a esta subcategoría es la *bomba hidráulica* que utilizaba la máquina de Newcomen. En el *año 1712*, cuando el ingeniero inglés construyó su invento, las bombas eran muy sencillas y existían dos tipos: las bombas aspirantes y las bombas aspirantes-impelentes (Figura 28). La altura de elevación del agua que se conseguía con las primeras estaba limitada a los 10 metros, mientras que con las segundas esta altura dependía de la fuerza con la que el pistón impele el agua, la cual depende del peso del pistón y la fuerza con la que la máquina Newcomen accionaba la bomba [23].

Dadas las características de los dos tipos de bombas y que la mina en la cual fue instalada la primera máquina de Newcomen se encontraba a una profundidad de 51 yardas (aproximadamente 46 metros) [14], la bomba elegida para incluirla en el modelo digital ha sido la *bomba aspirante-impelente*.

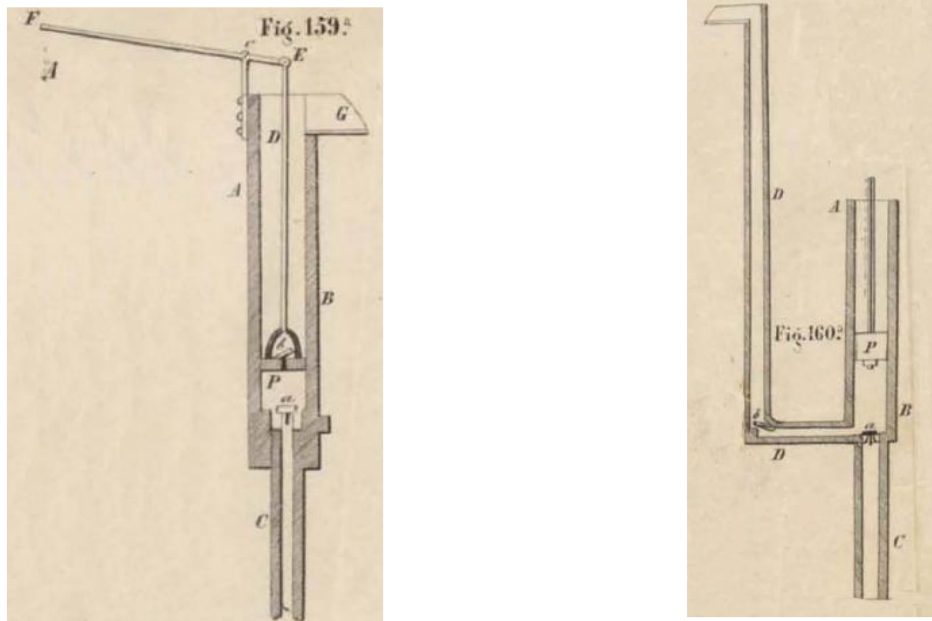


Figura 28: Esquema de las bombas aspirantes (izquierda) y aspirantes-impelentes (derecha) [23].

Como ejemplo del modelado de, al menos, una de las piezas que conforma la bomba, se aporta el modelo realizado del cuerpo de la bomba (Figura 29). Por otro lado, esta pieza puede observarse en el conjunto al que pertenece en el *modelo digital*, en la Figura 40.

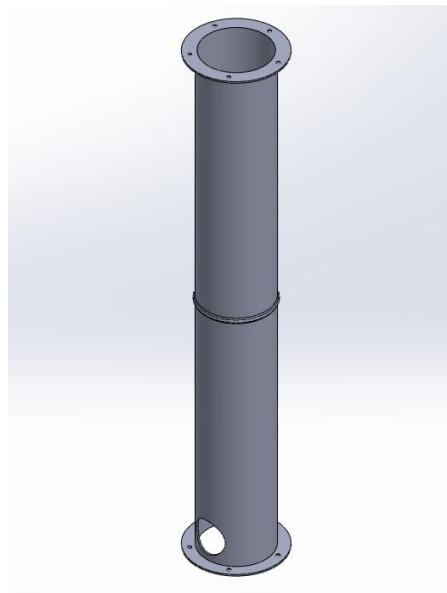


Figura 29: Modelo digital del cuerpo de la bomba hidráulica de la máquina de Newcomen.

5.4.3. Diseño de las piezas no observables en la figura 16 o en otras fuentes de información.

Además de las piezas que se han diseñado a partir del dibujo mostrado en la Figura 16 o de otras fuentes de información, como las Figura 21 a 24, hay otras piezas que han sido diseñadas para obtener un modelo que represente de forma más completa la funcionalidad de la máquina. Para estos componentes, es importante destacar que su geometría ha sido asumida y simplificada, puesto que la fidelidad del modelo con la realidad no es de tan elevada importancia para estas piezas, en comparación con la de los demás elementos (Subapartados 5.4.1. y 5.4.2.). Además, las medidas de estos componentes han sido dadas para que se ajusten y mantengan una proporcionalidad sensata a las demás piezas.

Este es el caso, por ejemplo, de todas las *válvulas antirretorno* (Figura 30) que se alojan dentro de las tuberías de la máquina, así como del *eje central* (Figura 31) sobre el que pivota la *viga elevadora*.

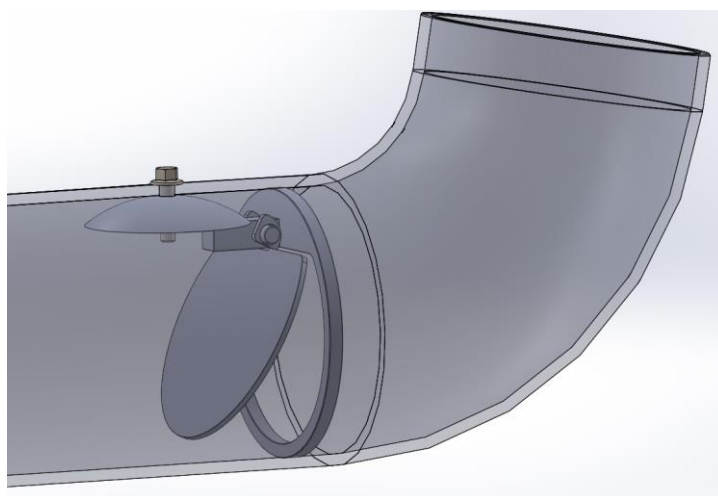


Figura 30: Conjunto de piezas de una de las válvulas antirretorno diseñada, en el interior de una de las tuberías de la máquina Newcomen.

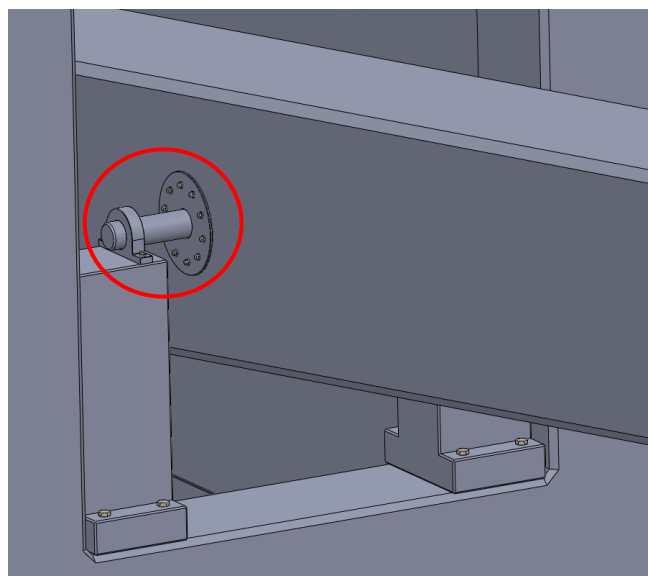


Figura 31: Conjunto de piezas del diseño simplificado del eje sobre el que pivota la viga elevadora.

5.5. Realización de los ensamblajes CAD de la máquina de Newcomen.

A la vez que se diseñaban las piezas del modelo digital, éstas eran ensambladas en sus respectivos sub-ensamblajes, según el grupo funcional al que pertenecen. Además, los sub-ensamblajes fueron agrupados en el ensamblaje general, formando así el modelo digital completo de la máquina de Newcomen.

A continuación, se muestran los resultados de, primero, los sub-ensamblajes realizados y, por último, el ensamblaje general completo de la máquina.

5.5.1. Resultado de los sub-ensamblajes de la máquina Newcomen.

Aquí se muestran, en orden de numeración siguiendo la nomenclatura CAD establecida (Apartado 5.2.), todos los sub-ensamblajes de cada grupo funcional (Apartado 5.1.) del modelo digital de la máquina de Newcomen que se ha alcanzado. Estas imágenes muestran únicamente una vista general del sub-ensamblaje, aunque en algunos casos también una vista de sección. Las vistas más específicas de ciertos componentes dentro de cada sub-ensamblaje, se podrán observar en el Capítulo 7, en el cual se desarrolla el funcionamiento de la máquina. Además, junto con la captura de cada sub-ensamblaje, se adjunta una imagen que muestra una lista de todas las piezas que forman cada uno de ellos (Figura 32 a Figura 65).

Debido a la gran cantidad de figuras que se muestran a continuación, primero se muestra la Tabla 1, la cual recoge el número de sub-ensamblaje junto con su nombre, el número de figura que representa la geometría de cada sub-ensamblaje y el número de figura que representa cada lista de piezas que forma cada sub-ensamblaje.

Tabla 1: Resumen de las figuras que muestran los sub-ensamblajes generados para el modelo digital de la máquina de Newcomen.

Número y Nombre de sub-ensamblaje	Número de figura de geometría	Número de figura de lista de componentes
01-01-00: Cilindro Principal	Figura 32	Figura 33
01-02-00: Caldera	Figura 34	Figura 35
01-03-00: Edificio	Figura 36	Figura 37
01-04-00: Viga Elevadora	Figura 38	Figura 39
01-05-00: Bomba Hidráulica	Figura 40	Figura 41
01-06-00: Válvula de Vapor	Figura 42	Figura 43
01-07-00: Válvula de Inyección	Figura 44	Figura 45
01-08-00: Tubería Maestra y Ramas al cilindro principal	Figura 46	Figura 47
01-09-00: Tubería de Desagüe del Depósito Superior	Figura 48	Figura 49
01-10-00: Tubería de Recirculación	Figura 50	Figura 51
01-11-00: Tubería de Desagüe del cilindro principal	Figura 52	Figura 53
01-12-00: Elementos externos al edificio	Figura 54 y Figura 55	Figura 56 y Figura 57
01-13-00: Cadena entre la viga elevadora y el pistón del cilindro principal	Figura 58	Figura 59

01-14-00: Cadena entre el vástago principal de la bomba de la mina y la viga elevadora	Figura 60	Figura 61
01-15-00: Cadena inferior entre la viga elevadora y la bomba hidráulica del edificio	Figura 62	Figura 63
01-16-00: Cadena superior entre la viga elevadora y la bomba hidráulica del edificio	Figura 64	Figura 65

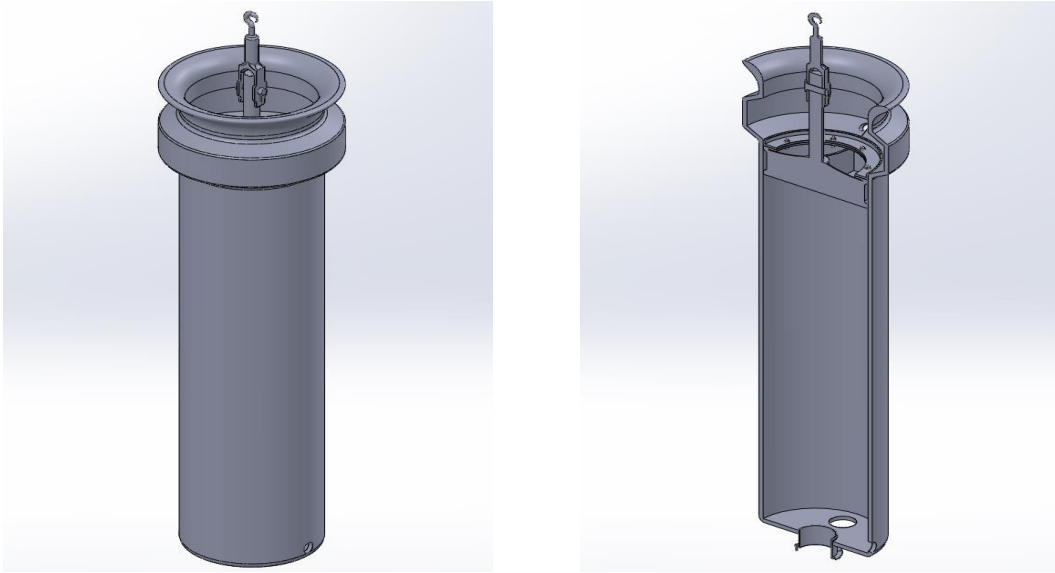


Figura 32: Sub-ensamblaje 01-01-00, respectivo al Cilindro Principal de la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa (izquierda) y vista general de sección (derecha).

- ▶ (f) TFM-MV-NW_01-01-01_PART-Cilindro<1> (Predeterminado) <<Pi
- ▶ TFM-MV-NW_01-01-02_PART-CilindroTuboVapor<1> (Predetermina
- ▶ TFM-MV-NW_01-01-03_PART-CilindroPistónCuerpo<1> (Predetermir
- ▶ TFM-MV-NW_01-01-04_PART-CilindroPistónSelloSuperior<1> (Prede
- ▶ TFM-MV-NW_01-01-05_PART-CilindroPistónEnganche<1> (Predeterr
- ▶ TFM-MV-NW_01-01-06_PART-CilindroPistónEnganchePasador<1> (P
- ▶ TFM-MV-NW_01-01-07_PART-CilindroPistónEnganchePasadorPin<1>

Figura 33: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-01-00, respectivo al Cilindro Principal.

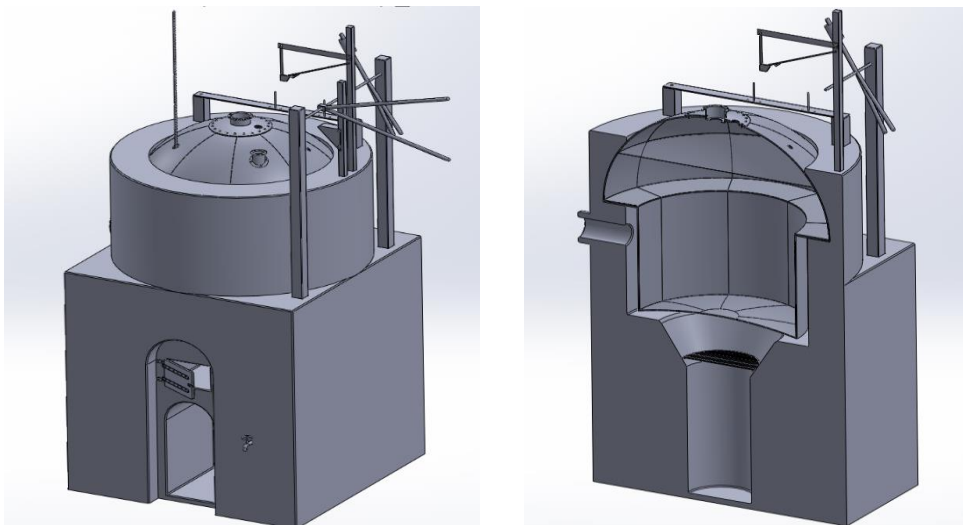


Figura 34: Sub-ensamblaje 01-02-00, respectivo a la Caldera de la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa (izquierda) y vista general de sección (derecha).









































- ▶  (f) TFM-MV-NW_01-02-01_PART-CalderaCilindro<1> -> (Predeterminad
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-02_PART-CalderaCúpulaPlomo<1> -> (Predetermin
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-03_PART-CalderaTapaSuperiorCúpula<1> (Predete
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-04_PART-CalderaEncapsuladoLadrillo<1> -> (Prede
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-05_PART-CalderaAnilloRejilla<1> (Predeterminado
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-06_PART-CalderaPuertaCombustible<1> -> (Predet
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-07_PART-CalderaBridaPuerta1<1> (Predeterminad
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-07_PART-CalderaBridaPuerta1<2> (Predeterminad
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-08_PART-CalderaBridaPuerta2<1> (Predeterminad
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-08_PART-CalderaBridaPuerta2<2> (Predeterminad
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-09_PART-CalderaPasadorBridaPuerta<1> (Predeteri
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-09_PART-CalderaPasadorBridaPuerta<2> (Predeteri
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-10_PART-CalderaBridaCierrePuerta<1> (Predeterm
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-11_PART-CalderaEngancheCierrePuerta<1> (Predet
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-12_PART-CalderaBridaTuberíaAguaRelleno<1> (Pre
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-13_PART-CalderaColumnaTopesValvulaVapor<1> (
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-13_PART-CalderaColumnaTopesValvulaVapor<2> (
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-14_PART-CalderaTablonTopesValvulaVapor<1> (Pr
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-14_PART-CalderaTablonTopesValvulaVapor<2> (Pr
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-15_PART-CalderaApoyoEnramadaValvulaVapor<1>
- ▶  (-) TFM-MV-NW_01-02-16_PART-CalderaEnramadaValvulaVapor<1> (Predet
- ▶  (-) TFM-MV-NW_01-02-17_PART-ValvulaVaporPalancaY<1> (Predeterminad
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-18_PART-CalderaTablonTopesValvulaVapor<2> (Predet
- ▶  (-) TFM-MV-NW_01-02-19_PART-ValvulaVaporPalancaYPeso<1> (Predetermi
- ▶  (-) TFM-MV-NW_01-02-20_PART-ValvulaVaporPalancaYPequeña<1> (Predete
- ▶  (-) TFM-MV-NW_01-02-21_PART-AguaDeLaCaldera<1> (Predeterminado) <-
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-22_PART-ColumnaTopePalancaF<1> -> (Predeterminad
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-23_PART-ColumnaRetenedor<1> -> (Predeterminado) <
- ▶  (-) TFM-MV-NW_01-02-24_PART-ValvulaDelInyeccionRetenedor<1> (Predete
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-25_PART-ValvulaDelInyeccionRetenedorEje<1> (Predete
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-26_PART-ValvulaDelInyeccionTopePalancaF<1> (Predete
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-27_PART-ValvulaDelInyeccionPlanchaRetenedorLeva<1>
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-28_PART-ValvulaDelInyeccionRetenedorLeva<1> (Predet
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-29_PART-MedidorNivelDeAguaCaldera<1> (Predetermi
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-30_PART-MedidorNivelDeAguaCalderaIndicador<1> ->
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-31_PART-TuberiaDesagueManualCaldera<1> (Predeter
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-32_PART-ManillaValvulaManualDesagueCaldera<1> (De
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-33_PART-PasadorValvulaManualDesagueCaldera<1> (Pi
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-34_PART-BolaValvulaManualDesagueCaldera<1> (Prede
- ▶  TFM-MV-NW_01-02-35_PART-CompuertaValvulaManualDesagueCaldera<1>

Figura 35: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-02-00, respectivo a la Caldera.

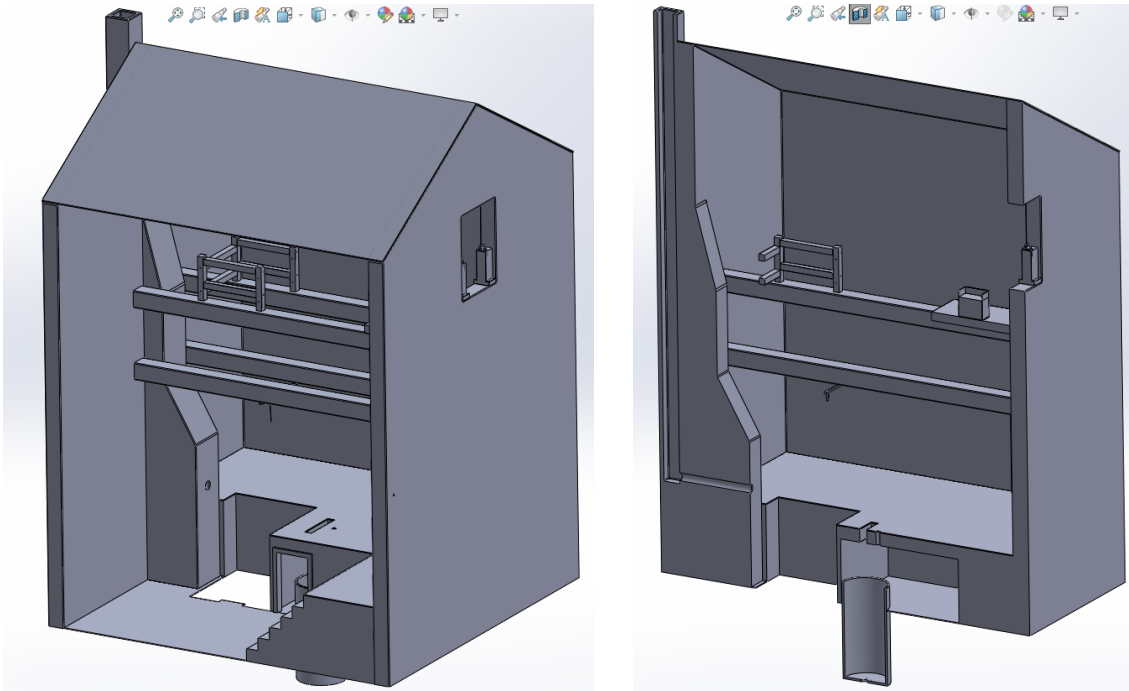


Figura 36: Sub-ensamblaje 01-03-00, respectivo al Edificio en el que se instala la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa (izquierda) y vista general de sección (derecha).

- ▶ (f) TFM-MV-NW_01-03-01_PART-Paredes<1> ->? (Predeterminado) <<Prede
- ▶ TFM-MV-NW_01-03-02_PART-Techo<1> (Predeterminado) <<Predetermina
- ▶ TFM-MV-NW_01-03-03_PART-SueloPlantaSuperior<1> ->? (Predeterminado
- ▶ TFM-MV-NW_01-03-04_PART-SueloPlantaSotano<1> (Predeterminado) <<P
- ▶ TFM-MV-NW_01-03-05_PART-Vigas<1> (Predeterminado) <<Predeterminad
- ▶ TFM-MV-NW_01-03-05_PART-Vigas<2> (Predeterminado) <<Predeterminad
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-03-06_PART-EstructuraVigasSuperioresColumnas<1> ->
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-03-06_PART-EstructuraVigasSuperioresColumnas<2> ->
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-03-07_PART-EstructuraVigasSuperioresVigas<1> (Predet
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-03-07_PART-EstructuraVigasSuperioresVigas<2> (Predet
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-03-07_PART-EstructuraVigasSuperioresVigas<5> (Predet
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-03-07_PART-EstructuraVigasSuperioresVigas<6> (Predet
- ▶ TFM-MV-NW_01-03-08_PART-BaseApoyoDepósitoSuperior<1> (Predetermi
- ▶ TFM-MV-NW_01-03-09_PART-MarcoPuertaCasa<1> (Predeterminado) <<Pre
- ▶ TFM-MV-NW_01-03-10_PART-BloqueSujeciónEjeRotacionViga<1> ->? (Pred
- ▶ TFM-MV-NW_01-03-10_PART-BloqueSujeciónEjeRotacionViga<2> ->? (Pred
- ▶ TFM-MV-NW_01-03-11_PART-BloqueRodamientoEjeViga<3> (Predetermina
- ▶ TFM-MV-NW_01-03-11_PART-BloqueRodamientoEjeViga<4> (Predetermina
- ▶ TFM-MV-NW_01-03-12_PART-DepósitoSuperior<1> (Predeterminado) <<Pri
- ▶ TFM-MV-NW_01-03-13_PART-MarcoPuertaHabitacionBomba<1> (Predeterm
- ▶ TFM-MV-NW_01-03-14_PART-AguaDelDepositoSuperior<1> (Predeterminac
- ▶ TFM-MV-NW_01-03-15_PART-VigaParaValvulaDelnyeccion<1> (Predetermin
- ▶ TFM-MV-NW_01-03-16_PART-ColumnaParaValvulaDelnyeccion<1> (Predete
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-03-17_PART-ValvulaDelnyeccionLeva<1> (Predetermina
- ▶ TFM-MV-NW_01-03-18_PART-ValvulaDelnyeccionLevaEje<1> (Predetermina
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-03-19_PART-ValvulaDelnyeccionCordonLevaPalanca<2>

Figura 37: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-03-00, respectivo al Edificio en el que se instala la máquina.

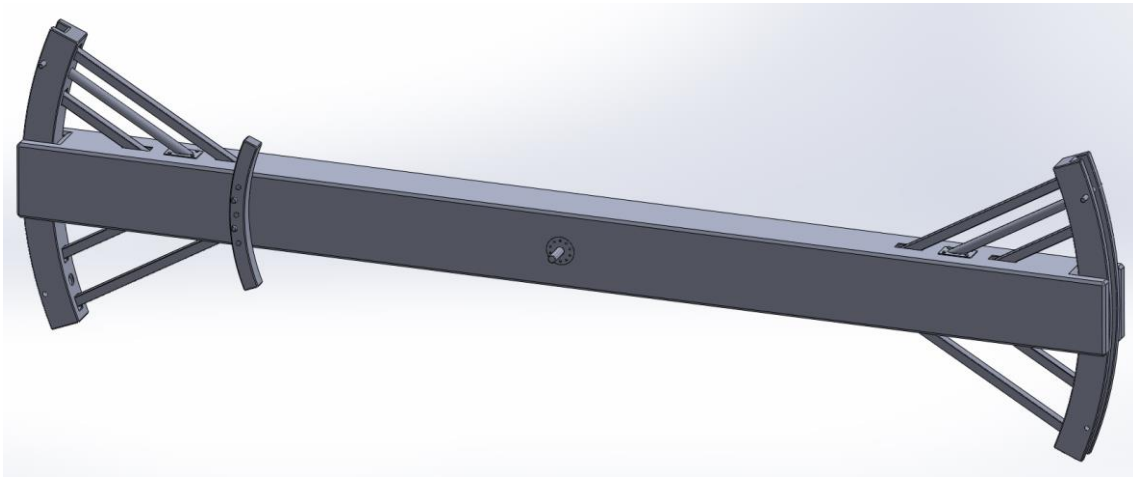


Figura 38: Sub-ensamblaje 01-04-00, respectivo a la Viga Elevadora de la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa.

- ▶ (f) TFM-MV-NW_01-04-01_PART-VigaPrincipal<1> -> (Predeterminado) <<Predete
- ▶ TFM-MV-NW_01-04-02_PART-VigaPrincipalArcosExtremos<1> -> (Predeterminado)
- ▶ TFM-MV-NW_01-04-02_PART-VigaPrincipalArcosExtremos<2> -> (Predeterminado)
- ▶ TFM-MV-NW_01-04-03_PART-VigaPrincipalDiagonalesLargas<1> (Predeterminado)
- ▶ TFM-MV-NW_01-04-03_PART-VigaPrincipalDiagonalesLargas<2> (Predeterminado)
- ▶ TFM-MV-NW_01-04-03_PART-VigaPrincipalDiagonalesLargas<5> (Predeterminado)
- ▶ TFM-MV-NW_01-04-03_PART-VigaPrincipalDiagonalesLargas<6> (Predeterminado)
- ▶ TFM-MV-NW_01-04-04_PART-VigaPrincipalDiagonalesCortas<1> (Predeterminado)
- ▶ TFM-MV-NW_01-04-04_PART-VigaPrincipalDiagonalesCortas<2> (Predeterminado)
- ▶ TFM-MV-NW_01-04-04_PART-VigaPrincipalDiagonalesCortas<5> (Predeterminado)
- ▶ TFM-MV-NW_01-04-04_PART-VigaPrincipalDiagonalesCortas<6> (Predeterminado)
- ▶ TFM-MV-NW_01-04-05_PART-VigaPrincipalDiagonalesMediaEngancheCadenas<1>
- ▶ TFM-MV-NW_01-04-05_PART-VigaPrincipalDiagonalesMediaEngancheCadenas<3>
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-04-06_PART-VigaPrincipalPasadorEngancheCadenas<1> (Prede
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-04-06_PART-VigaPrincipalPasadorEngancheCadenas<2> (Prede
- ▶ TFM-MV-NW_01-04-07_PART-VigaPrincipalChapaEje<1> (Predeterminado) <<Pred
- ▶ TFM-MV-NW_01-04-07_PART-VigaPrincipalChapaEje<2> (Predeterminado) <<Pred
- ▶ TFM-MV-NW_01-04-08_PART-VigaPrincipalChapaEjePasador<1> (Predeterminado)
- ▶ TFM-MV-NW_01-04-08_PART-VigaPrincipalChapaEjePasador<2> (Predeterminado)
- ▶ TFM-MV-NW_01-04-09_PART-VigaPrincipalArcoIntermedio<1> (Predeterminado) <
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-04-10_PART-PasadorArcoIntermedio<1> (Predeterminado) <<
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-04-10_PART-PasadorArcoIntermedio<2> (Predeterminado) <<

Figura 39: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-04-00, respectivo a la Viga Elevadora.

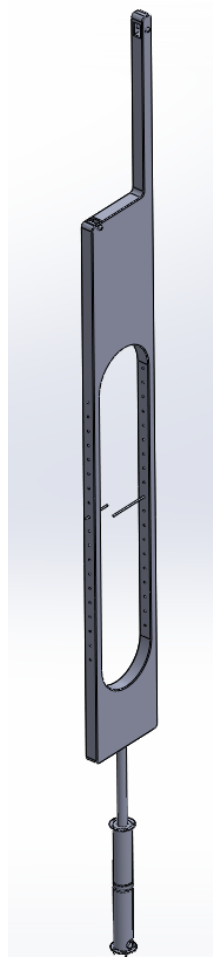


Figura 40: Sub-ensamblaje 01-05-00, respectivo a la Bomba Hidráulica principal de la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa.

- ▶ TFM-MV-NW_01-05-01_PART-Vastago<1> (Predeterminado) <<Predetermin
- ▶ TFM-MV-NW_01-05-02_PART-VastagoBomba<1> (Predeterminado) <<Prede
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-05-03_PART-BombaCilindro<1> (Predeterminado) <<Pre
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-05-04_PART-BombaCilindroTapadera<1> (Predetermina
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-05-04_PART-BombaCilindroTapadera<2> (Predetermina
- ▶ TFM-MV-NW_01-05-05_PART-BombaPiston<1> (Predeterminado) <<Predete
- ▶ TFM-MV-NW_01-05-06_PART-BombaPistonSelloCuero<1> (Predeterminado)
- ▶ TFM-MV-NW_01-05-07_PART-BombaPasadorVastago<1> (Predeterminado)
- ▶ TFM-MV-NW_01-05-08_PART-BombaPasadorVastagoValvulaDelnyeccion<1>
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-05-09_PART-BombaValvulaInferior<1> (Predeterminado;
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-05-10_PART-BombaValvulaInferiorTope<1> (Predetermi
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-05-11_PART-PasadorVigaVerticalParaCadena<1> (Predet
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-05-11_PART-PasadorVigaVerticalParaCadena<2> (Predet

Figura 41: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-05-00, respectivo a la Bomba Hidráulica principal.

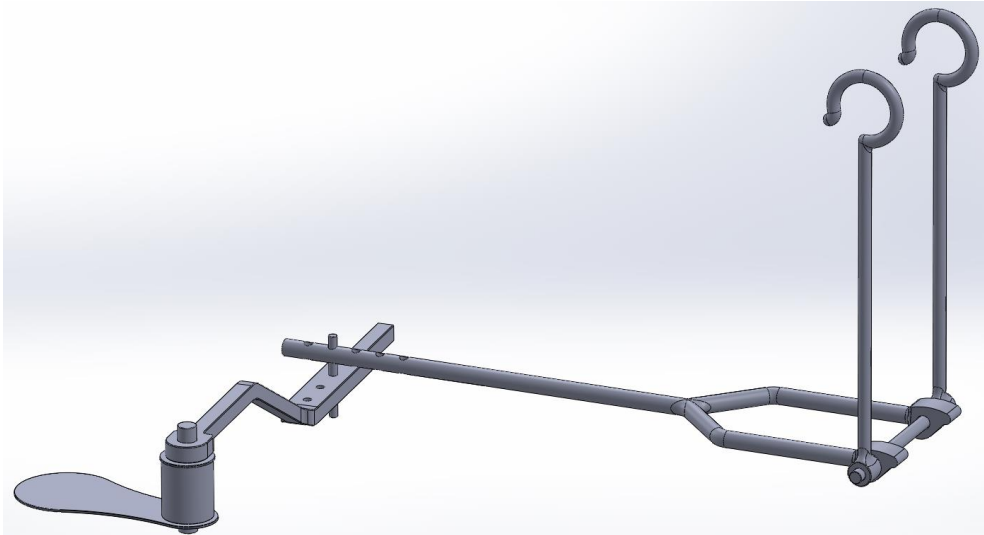


Figura 42: Sub-ensamblaje 01-06-00, respectivo a la Válvula de Vapor de la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa.

- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-06-01_PART-ValvulaVaporCompuerta<3> (Predeterminado) <
- ▶ TFM-MV-NW_01-06-02_PART-ValvulaVaporBasePalancaCompuerta<1> (Predeterm
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-06-03_PART-ValvulaVaporTapaBasePalancaCompuerta<1> (Pi
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-06-04_PART-ValvulaVaporPasadorBasePalancaCompuerta<1>
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-06-05_PART-ValvulaVaporPalancaCompuerta<1> (Predetermi
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-06-06_PART-ValvulaVaporLinkHorizontal<1> (Predeterminad
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-06-07_PART-ValvulaVaporPasadorLinkHorizontalPalanca<1> (
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-06-08_PART-ValvulaVaporEstribo<1> (Predeterminado) <<Pre
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-06-09_PART-ValvulaVaporGanchosEstribo<1> (Predeterminad
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-06-09_PART-ValvulaVaporGanchosEstribo<2> (Predeterminad

Figura 43: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-06-00, respectivo a la Válvula de Vapor.

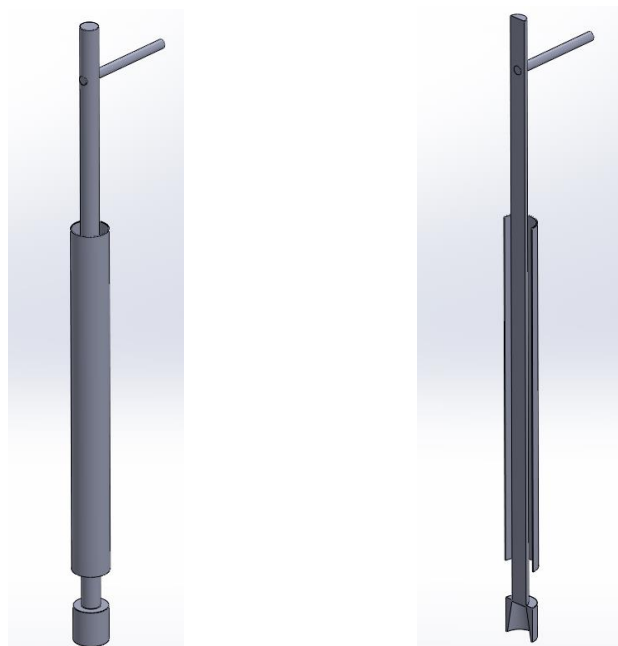


Figura 44: Sub-ensamblaje 01-07-00, respectivo a la Válvula de Inyección de la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa (izquierda) y vista general de sección (derecha).







- ▶   (f) TFM-MV-NW_01-07-01_PART-ValvulaInyeccionCilindroBoya<1> (Pre
- ▶   (-) TFM-MV-NW_01-07-02_PART-ValvulaInyeccionBoya<1> (Predetermi
- ▶   (-) TFM-MV-NW_01-07-03_PART-ValvulaInyeccionPasadorBoyaLeva<1>

Figura 45: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-07-00, respectivo a la Válvula de Inyección.

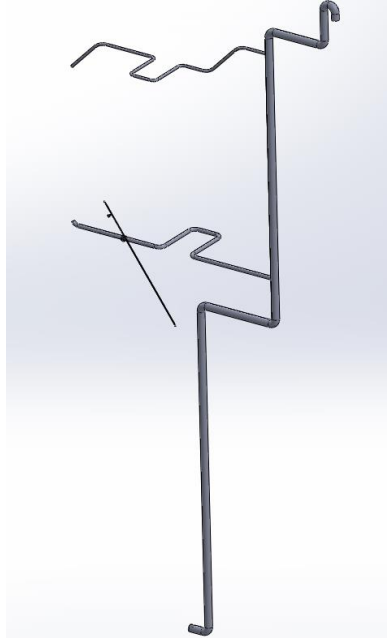


Figura 46: Sub-ensamblaje 01-08-00, respectivo a la Tubería Maestra y Ramas al cilindro principal de la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa.























- ▶   (f) TFM-MV-NW_01-08-01_PART-TuberiaMaestra<1> ->? (Predeterminado)
- ▶   TFM-MV-NW_01-08-02_PART-TuberiaRamalInyeccionAgua<2> (Predetermi
- ▶   TFM-MV-NW_01-08-03_PART-TuberiaRamaAguaSelladoPiston<1> (Predete
- ▶   TFM-MV-NW_01-08-04_PART-ValvulaDelInyeccionTapaValvula<1> (Predete
- ▶   TFM-MV-NW_01-08-05_PART-ValvulaDelInyeccionBolaValvula<1> (Predete
- ▶   TFM-MV-NW_01-08-06_PART-ValvulaDelInyeccionEjeGiratorioValvula<1> (I
- ▶   TFM-MV-NW_01-08-07_PART-ValvulaDelInyeccionPalanca<1> (Predetermir
- ▶   TFM-MV-NW_01-08-08_PART-ValvulaTuberiaMaestraBomba<1> (Predeterr
- ▶   TFM-MV-NW_01-08-09_PART-ValvulaTuberiaMaestraBombaPasador<1> (P
- ▶   TFM-MV-NW_01-08-10_PART-ValvulaTuberiaMaestraBombaBridaTope<1>
- ▶   TFM-MV-NW_01-08-11_PART-ValvulaTuberiaMaestraBombaEscotilla<1> (F

Figura 47: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-08-00, respectivo a la Tubería Maestra y Ramas.

En los siguientes dos sub-ensamblajes (Figura 48 y 49 para el sub-ensamblaje 01-09-00 y Figura 50 y 51 para el sub-ensamblaje 01-10-00) se puede apreciar que cada uno de ellos contiene únicamente una pieza. Aunque no parezca intuitivo, se ha procedido de esta forma puesto que el ensamblaje general (01-00-00, mostrado en la Figura 66 a Figura 68) únicamente puede contener sub-ensamblajes y no piezas sueltas, siguiendo la *Metodología de Diseño* establecida en la introducción del Capítulo 5.

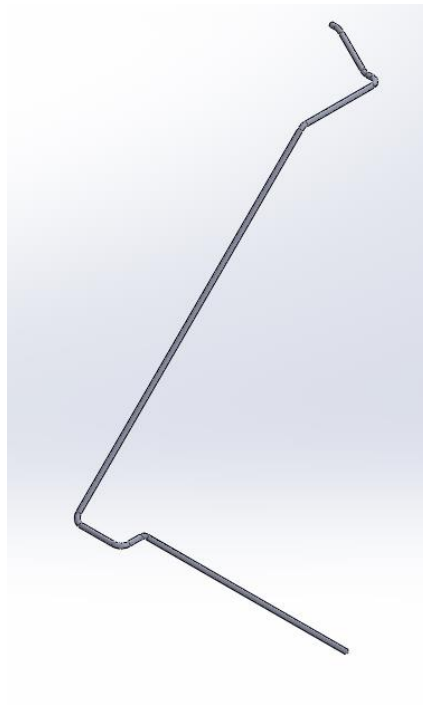


Figura 48: Sub-ensamblaje 01-09-00, respectivo a la Tubería de Desagüe del Depósito Superior de la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa.



▶   (f) TFM-MV-NW_01-09-01_PART-TuberiaDesagueDepositoSuperior<1>

Figura 49: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-09-00, respectivo a la Tubería de Desagüe del Depósito Superior.



Figura 50: Sub-ensamblaje 01-10-00, respectivo a la Tubería de Recirculación entre el cilindro y la caldera de la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa.



▶   (f) TFM-MV-NW_01-10-01_PART-TuberiaAguaSobranteSelloAguaPistonACaldera<1>

Figura 51: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-10-00, respectivo a la Tubería de Recirculación entre el cilindro y la caldera.

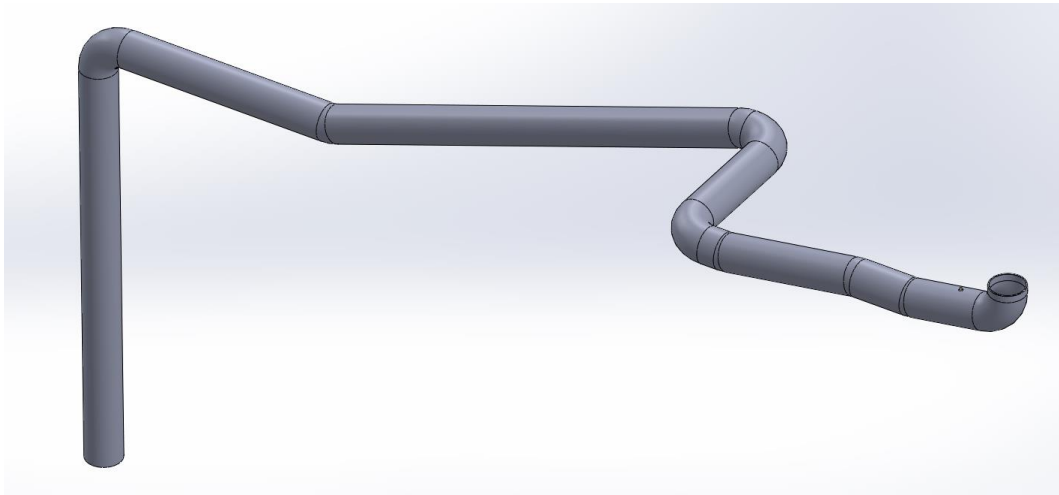


Figura 52: Sub-ensamblaje 01-11-00, respectivo a la Tubería de Desagüe del cilindro principal de la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa.

- ▶ (f) TFM-MV-NW_01-11-01_PART-TuberiaDesagueCilindro<1> ->? (Predeterr
- ▶ (f) TFM-MV-NW_01-11-02_PART-ValvulaTuberiaDesagueCilindroBase<1> (Pred
- ▶ (f) TFM-MV-NW_01-11-03_PART-ValvulaTuberiaDesagueCilindroPasador<1> (F
- ▶ (f) TFM-MV-NW_01-11-04_PART-ValvulaTuberiaDesagueCilindroBridaTope<1>
- ▶ (f) TFM-MV-NW_01-11-05_PART-ValvulaTuberiaDesagueCilindroEscotilla<1> (f

Figura 53: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-11-00, respectivo a la Tubería de Desagüe del cilindro principal.

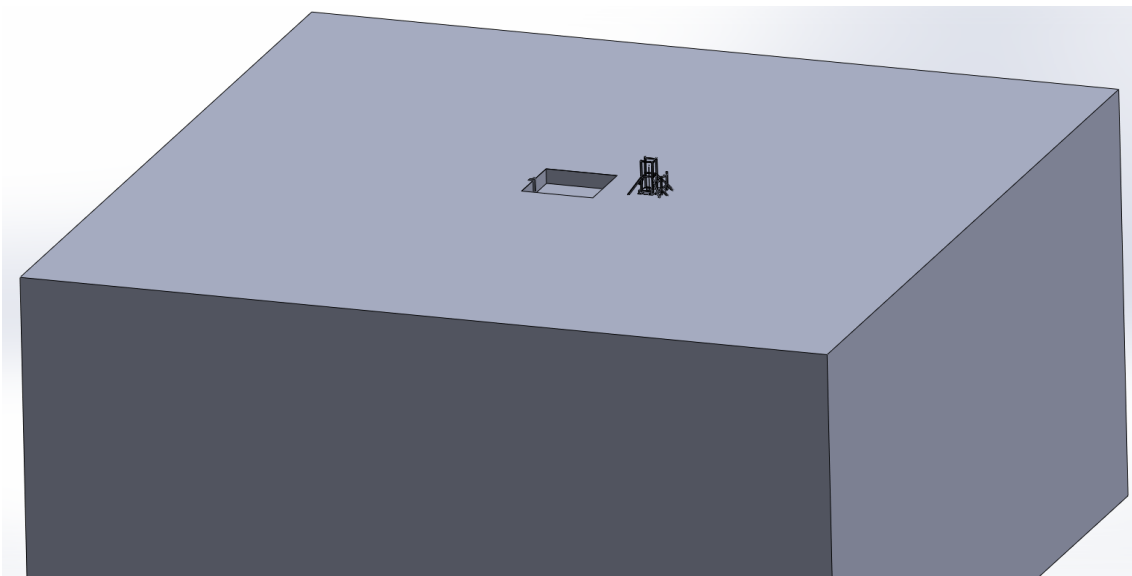


Figura 54: Sub-ensamblaje 01-12-00, respectivo a los Elementos Externos al edificio en el que se instala la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa.

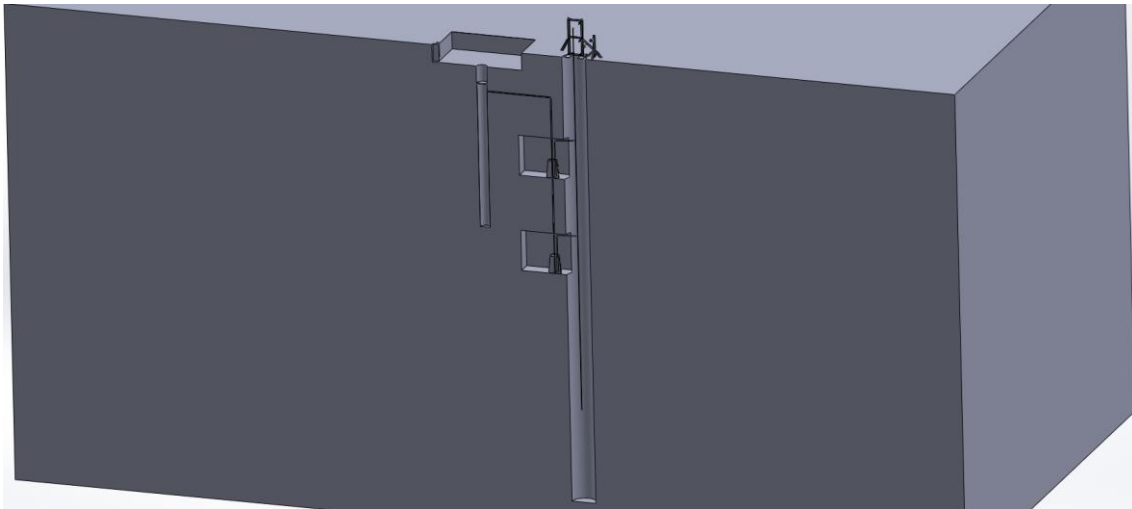


Figura 55: Sub-ensamblaje 01-12-00, respectivo a los Elementos Externos al edificio en el que se instala la máquina de vapor de Newcomen. Vista general de sección.

- ▶ (f) TFM-MV-NW_01-12-01_PART-SueloExteriorEdificio<1> ->? (Predeterminado) <<Pre
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-02_PART-EstructuraSuperficieMina<1> (Predeterminado<Como so
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-03_PART-TablonesBaseParaEstructura<1> (Predeterminado) <<Pre
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-03_PART-TablonesBaseParaEstructura<2> (Predeterminado) <<Pre
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-12-04_PART-BombeoLadoMina<1> (Predeterminado) <<Predeterri
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-05_PART-CuboAguaInteriorMina<3> ->? (Predeterminado) <<Prec
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-06_PART-CuboAguaInteriorMinaAgua<1> (Predeterminado) <<Pre
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-06_PART-CuboAguaInteriorMinaAgua<2> (Predeterminado) <<Pre
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-07_PART-TuberíaEntreCubosDeAgua<1> (Predeterminado) <<Pre
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-08_PART-TuberíaEntreCuboDeAguaYPozo<1> (Predeterminado) <
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-09_PART-TuberíaPozo<1> (Predeterminado) <<Predeterminado>
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-12-10_PART-BombaPistonInteriorMina<1> (Predeterminado) <<Pr
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-12-10_PART-BombaPistonInteriorMina<2> (Predeterminado) <<Pr
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-11_PART-BombaCilindroInteriorMina<1> (Predeterminado) <<Pre
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-11_PART-BombaCilindroInteriorMina<2> (Predeterminado) <<Pre
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-12_PART-CuboAguaInteriorMina<2> -> (Predeterminado) <<Predi
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-13_PART-CuboAguaInteriorMinaTuberíaAccesoCilindroBomba<1>
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-13_PART-CuboAguaInteriorMinaTuberíaAccesoCilindroBomba<2>
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-14_PART-ValvulaTuberia<1> (Predeterminado) <<Predeterminad
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-14_PART-ValvulaTuberia<2> (Predeterminado) <<Predeterminad
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-14_PART-ValvulaTuberia<3> (Predeterminado) <<Predeterminad
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-14_PART-ValvulaTuberia<4> (Predeterminado) <<Predeterminad
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-15_PART-ValvulaTuberiaEscotilla<1> (Predeterminado) <<Predete
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-15_PART-ValvulaTuberiaEscotilla<2> (Predeterminado) <<Predete
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-15_PART-ValvulaTuberiaEscotilla<3> (Predeterminado) <<Predete
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-15_PART-ValvulaTuberiaEscotilla<4> (Predeterminado) <<Predete
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-16_PART-ValvulaTuberiaPasador<1> (Predeterminado) <<Predeteri
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-16_PART-ValvulaTuberiaPasador<2> (Predeterminado) <<Predeteri
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-16_PART-ValvulaTuberiaPasador<3> (Predeterminado) <<Predeteri
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-16_PART-ValvulaTuberiaPasador<4> (Predeterminado) <<Predeteri
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-17_PART-ValvulaTuberiaBridaTope<1> (Predeterminado) <<Predet
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-17_PART-ValvulaTuberiaBridaTope<2> (Predeterminado) <<Predet
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-17_PART-ValvulaTuberiaBridaTope<3> (Predeterminado) <<Predet
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-17_PART-ValvulaTuberiaBridaTope<4> (Predeterminado) <<Predet
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-18_PART-TuberíaExpulsionAguaCilindro<1> (Predeterminado) <<Pi
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-18_PART-TuberíaExpulsionAguaCilindro<2> (Predeterminado) <<Pi
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-19_PART-PasadorParaTamborGiratorio<1> (Predeterminado) <<Pr
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-12-20_PART-TamborGiratorio<1> (Predeterminado) <<Predetermi
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-21_PART-EstructuraParaTamborGiratorio<1> (Predeterminado<Cor
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-21_PART-EstructuraParaTamborGiratorio<2> (Predeterminado<Cor

Figura 56: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-12-00, respectivo a los Elementos Externos al edificio.










- ▶  (-) TFM-MV-NW_01-12-22_PART-TamborGiratorioGrande<1> (Predeterminado) <<Pred
- ▶  (-) TFM-MV-NW_01-12-23_PART-PasadorIzquierdoTamborGiratorioGrande<1> (Predete
- ▶  (-) TFM-MV-NW_01-12-24_PART-PasadorDerechoTamborGiratorioGrande<1> (Predeter
- ▶  (-) TFM-MV-NW_01-12-25_PART-PalancaTamborGiratorioGrande<1> (Predeterminado)
- ▶  (-) TFM-MV-NW_01-12-26_PART-MangoTamborGiratorioGrande<1> (Predeterminado)
- ▶  (-) TFM-MV-NW_01-12-27_PART-TopeMangoTamborGiratorioGrande<1> (Predetermina
- ▶  TFM-MV-NW_01-12-28_PART-CuerdaTamborGiratorio<1> (Predeterminado) <<Predete
- ▶  (-) TFM-MV-NW_01-12-29_PART-FinalCuerdaTamborGiratorio<2> (Predeterminado) <<
- ▶  (-) TFM-MV-NW_01-12-30_PART-ArgollaCuerdaMina<1> (Predeterminado) <<Predeterr

Figura 57: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-12-00, respectivo a los Elementos Externos al edificio (Continuación).

En las Figuras 58, 60, 62 y 64, se muestran las geometrías de los sub-ensamblajes respectivos a las cadenas. Las formas de éstas corresponden con una aproximación a la realidad dadas las tangencias que tendrán con los arcos de la viga elevadora, cuando la máquina se encuentre en la posición observable en la Figura 66.

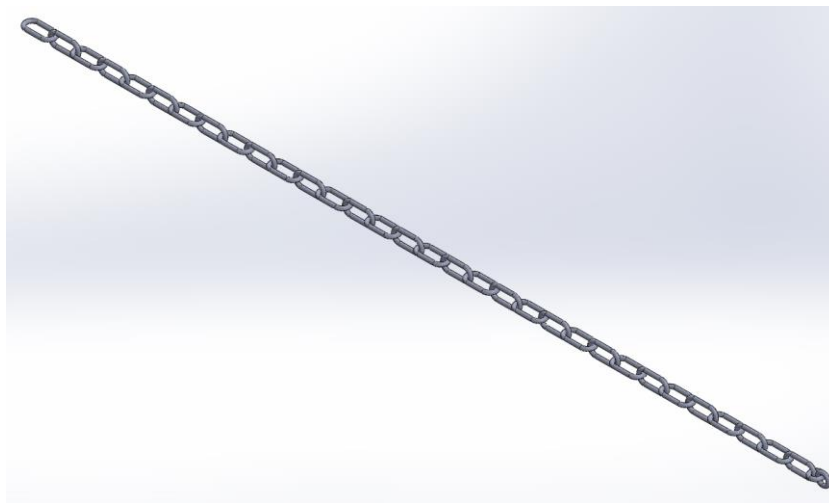


Figura 58: Sub-ensamblaje 01-13-00, respectivo a la Cadena entre la viga elevadora y el pistón del cilindro principal de la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa.





- ▶  (f) TFM-MV-NW_01-13-01_PART-EslabonCadena<1> (Pre
- ▶  TFM-MV-NW_01-13-01_PART-EslabonCadena<2> (Predel
- ▶  TFM-MV-NW_01-13-02_PART-EslabonCircularCadena<1>
- ▶  TFM-MV-NW_01-13-02_PART-EslabonCircularCadena<2>

Figura 59: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-13-00, respectivo a la Cadena entre la viga elevadora y el pistón del cilindro principal.

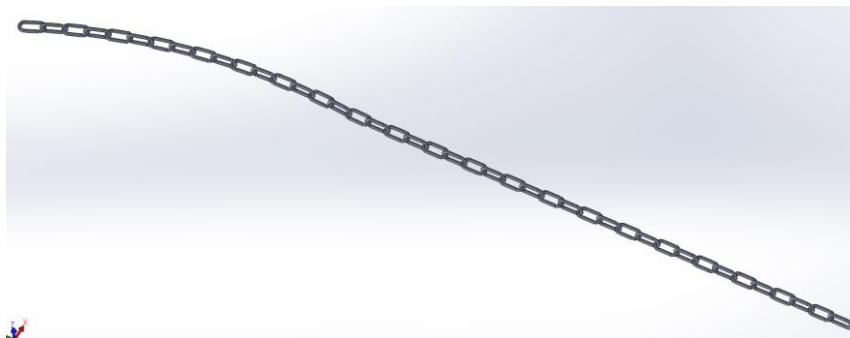


Figura 60: Sub-ensamblaje 01-14-00, respectivo a la Cadena entre el vástago principal de la bomba de la mina y la viga elevadora de la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa.

- ▶ TFM-MV-NW_01-14-01_PART-EslabonCadena<1> (
- ▶ TFM-MV-NW_01-14-01_PART-EslabonCadena<3> (
- ▶ TFM-MV-NW_01-14-01_PART-EslabonCadena<18>
- ▶ TFM-MV-NW_01-14-01_PART-EslabonCadena<19>
- ▶ TFM-MV-NW_01-14-01_PART-EslabonCadena<20>
- ▶ TFM-MV-NW_01-14-01_PART-EslabonCadena<21>

Figura 61: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-14-00, respetivo a la Cadena entre el vástago principal de la bomba de la mina y la viga elevadora.

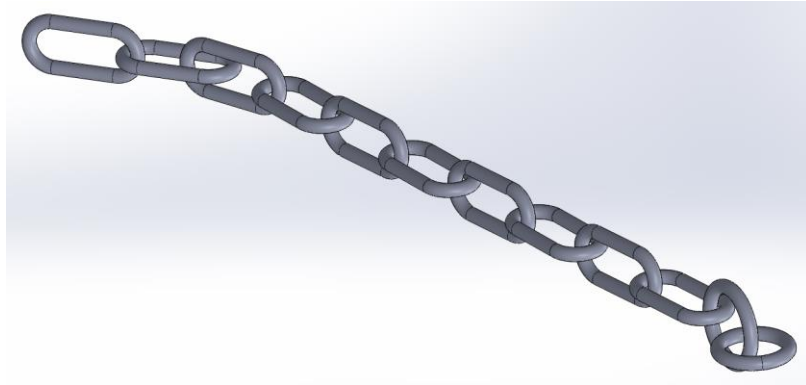


Figura 62: Sub-ensamblaje 01-15-00, respetivo a la Cadena Inferior entre la viga elevadora y el vástago de la bomba hidráulica principal de la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa.

- ▶ TFM-MV-NW_01-15-01_PART-EslabonCadenaIntermedia<1> (Prede
- ▶ TFM-MV-NW_01-15-01_PART-EslabonCadenaIntermedia<2> (Prede
- ▶ TFM-MV-NW_01-15-01_PART-EslabonCadenaIntermedia<3> (Prede
- ▶ TFM-MV-NW_01-15-01_PART-EslabonCadenaIntermedia<4> (Prede
- ▶ TFM-MV-NW_01-15-01_PART-EslabonCadenaIntermedia<10> (Prede
- ▶ TFM-MV-NW_01-15-01_PART-EslabonCadenaIntermedia<13> (Prede
- ▶ TFM-MV-NW_01-15-02_PART-EslabonCircularCadenaIntermedia<2>
- ▶ TFM-MV-NW_01-15-03_PART-EslabonCircularCadenaIntermedia<1>

Figura 63: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-15-00, respetivo a la Cadena Inferior entre la viga elevadora y el vástago de la bomba hidráulica principal.

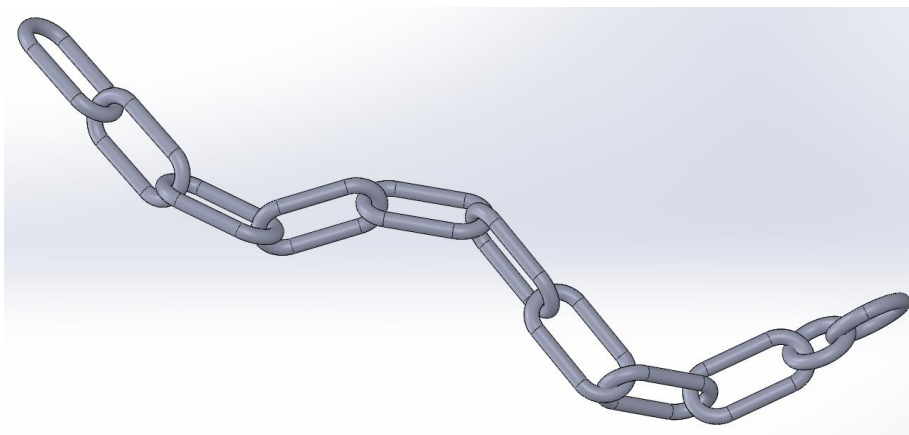


Figura 64: Sub-ensamblaje 01-16-00, respetivo a la Cadena Superior entre la viga elevadora y el vástago de la bomba hidráulica principal de la máquina de vapor de Newcomen. Vista general completa.

- ▶ TFM-MV-NW_01-16-01_PART-EslabonCadenaIntermedia<14> (Predi
- ▶ TFM-MV-NW_01-16-01_PART-EslabonCadenaIntermedia<23> (Predi
- ▶ TFM-MV-NW_01-16-01_PART-EslabonCadenaIntermedia<24> (Predi
- ▶ TFM-MV-NW_01-16-01_PART-EslabonCadenaIntermedia<25> (Predi
- ▶ TFM-MV-NW_01-16-01_PART-EslabonCadenaIntermedia<26> (Predi
- ▶ TFM-MV-NW_01-16-01_PART-EslabonCadenaIntermedia<27> (Predi
- ▶ TFM-MV-NW_01-16-01_PART-EslabonCadenaIntermedia<28> (Predi
- ▶ (-) TFM-MV-NW_01-16-01_PART-EslabonCadenaIntermedia<29> (Pr
- ▶ TFM-MV-NW_01-16-01_PART-EslabonCadenaIntermedia<30> (Predi
- ▶ TFM-MV-NW_01-16-02_PART-EslabonCircularCadenaIntermedia<2>
- ▶ TFM-MV-NW_01-16-03_PART-EslabonCircularCadenaIntermedia<2>

Figura 65: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-16-00, respectivo a la Cadena Superior entre la viga elevadora y el vástago de la bomba hidráulica principal.

5.5.2. Resultado del ensamblaje general completo de la máquina Newcomen.

En este capítulo se incluyen imágenes que muestran únicamente tres vistas del ensamblaje general: una completa (Figura 66) y otras dos de sección (Figura 67 y Figura 68). Mientras que en la Figura 67 se pueden observar los elementos internos del edificio, la Figura 68 muestra la vista de sección en la que se pueden observar los elementos internos de la mina sobre la que se instala la máquina de vapor. En el Capítulo 7, durante el estudio funcional de la máquina, se podrán observar algunas vistas más específicas de ciertos componentes. Además, se adjunta una captura que muestra una lista de todos los sub-ensamblajes que forman el ensamblaje general (Figura 69).

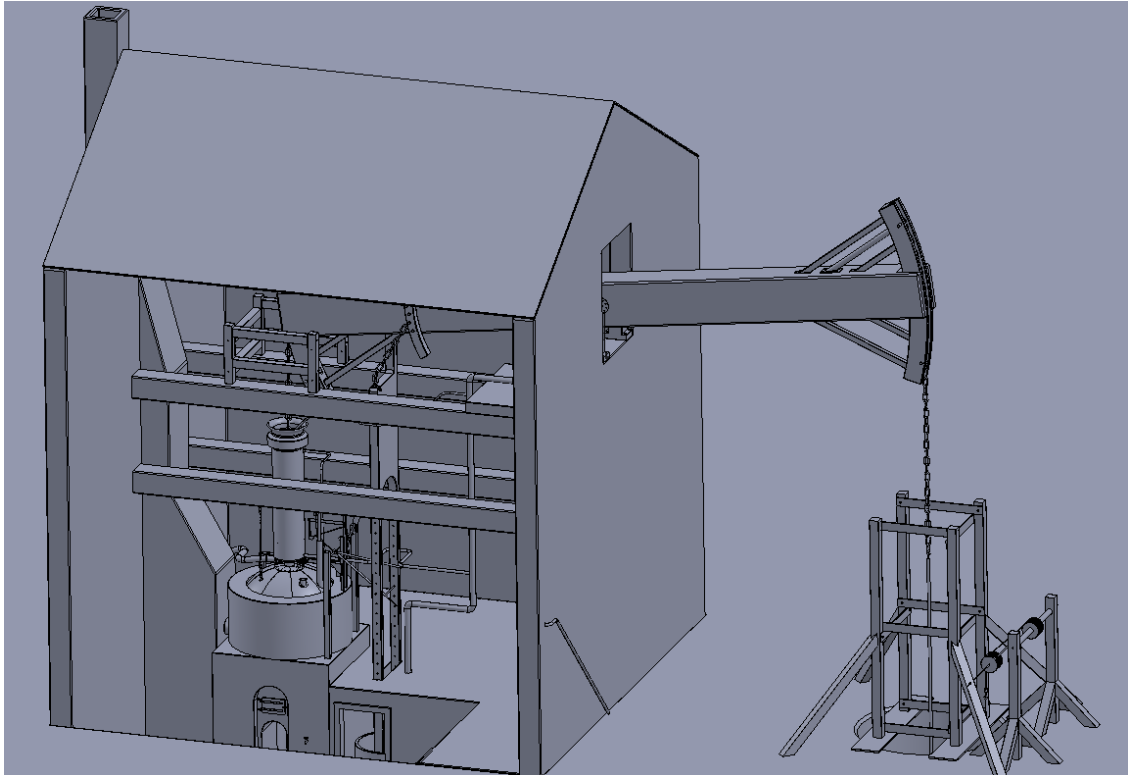


Figura 66: Ensamblaje general de la máquina de vapor de Newcomen, 01-00-00. Vista general completa cercana.

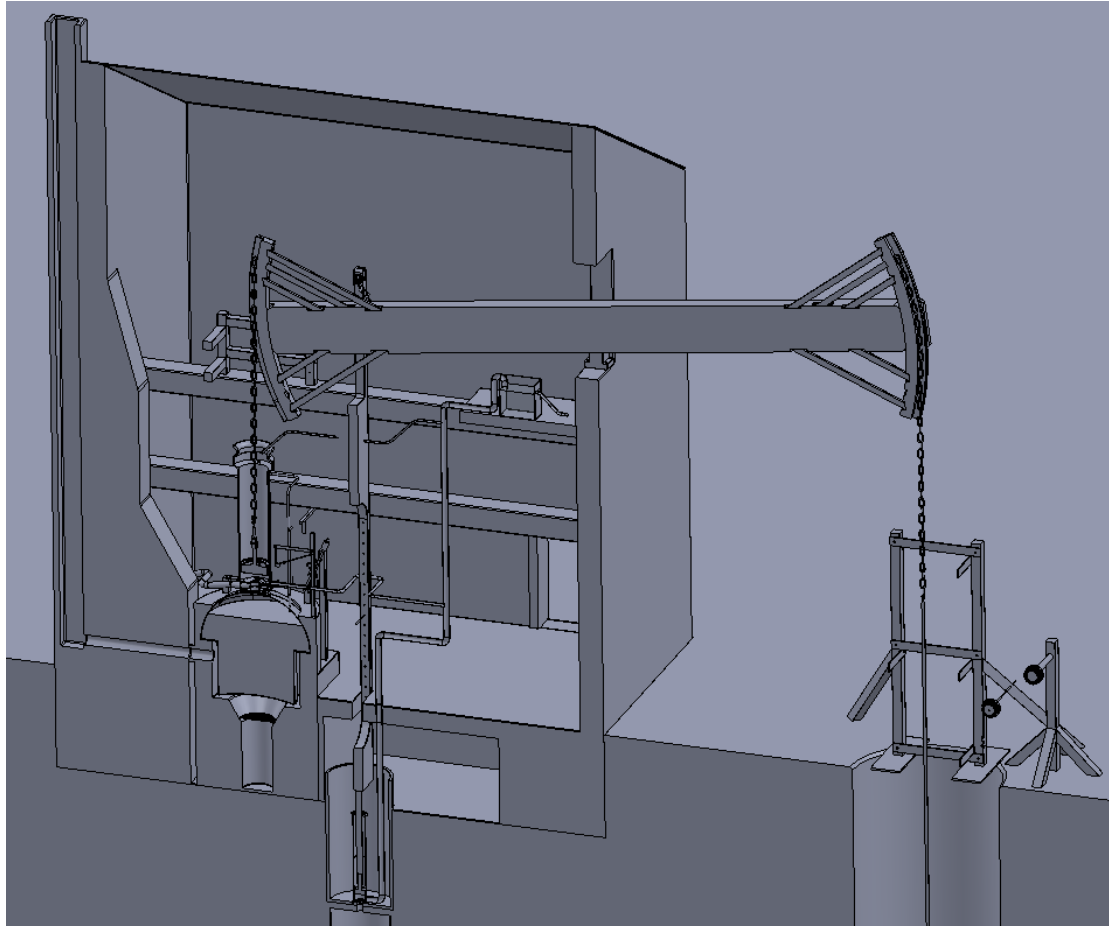


Figura 67: Ensamblaje general de la máquina de vapor de Newcomen, 01-00-00. Vista general de sección cercana.

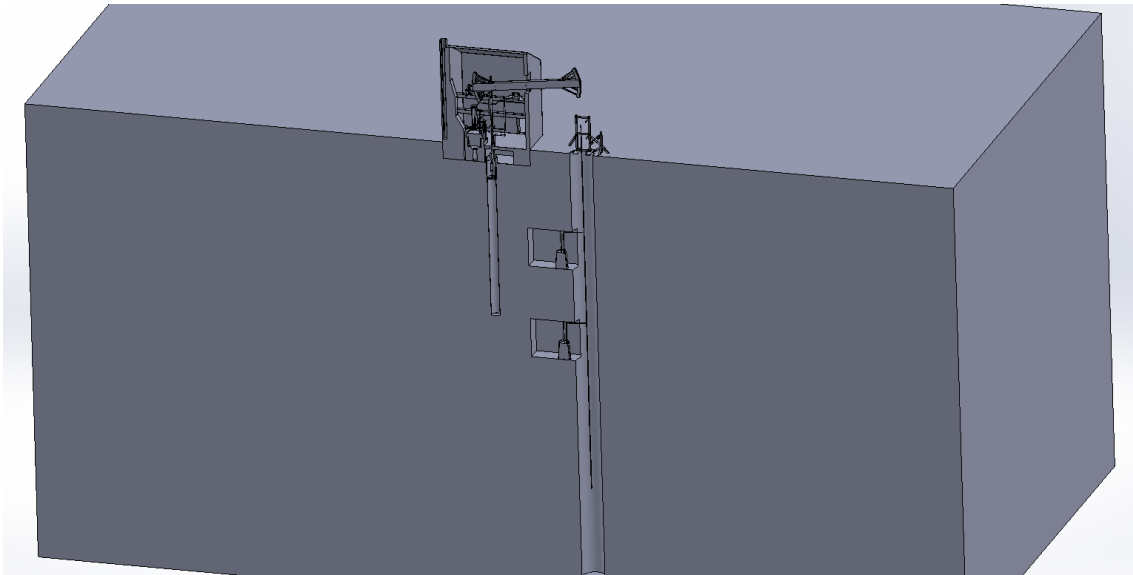


Figura 68: Ensamblaje general de la máquina de vapor de Newcomen, 01-00-00. Vista general de sección lejana.

- ▶ TFM-MV-NW_01-01-00_ASSY-CILINDROPRINCIPAL<3> (Predeterminado) <Estado de visua
- ▶ TFM-MV-NW_01-02-00_ASSY-CALDERA<2> (Predeterminado) <Estado de visualización-1>
- ▶ TFM-MV-NW_01-03-00_ASSY-CASA<1> (Predeterminado) <Estado de visualización-1>
- ▶ TFM-MV-NW_01-04-00_ASSY-VIGAELEVADORA<1> (Predeterminado) <Estado de visualiza
- ▶ TFM-MV-NW_01-05-00_ASSY-BOMBEOINTERIORCASA<1> (Predeterminado) <Estado de v
- ▶ TFM-MV-NW_01-06-00_ASSY-VALVULADEVAPOR<3> (Predeterminado) <Estado de visuali
- ▶ TFM-MV-NW_01-07-00_ASSY-VALVULADEINYECCION<1> (Predeterminado) <Estado de vis
- ▶ TFM-MV-NW_01-08-00_ASSY-SISTEMATUBERIAMAESTRAYRAMAS<1> (Predeterminado) <
- ▶ TFM-MV-NW_01-09-00_ASSY-TUBERIADESAGUEDEPOSITOSUPERIOR<1> (Predeterminado
- ▶ TFM-MV-NW_01-10-00_ASSY-TUBERIARECIRCULACIONSELLOAGUAPISTONACALDERA<1>
- ▶ TFM-MV-NW_01-11-00_ASSY-TUBERIADESAGUEDELCILINDRO<1> (Predeterminado) <Esta
- ▶ TFM-MV-NW_01-12-00_ASSY-EXTERIOREDIFICIO_V0-ConEngancheCuerdaPozo<2> (Predet
- ▶ TFM-MV-NW_01-13-00_ASSY-CADENALADOINTERIOR_V0-CadenaEnDetalle<1> (Predeter
- ▶ TFM-MV-NW_01-14-00_ASSY-CADENALADOEXTERIOR_V0-CadenaEnDetalle<2> (Predeter
- ▶ TFM-MV-NW_01-15-00_ASSY-CADENAINFERIORARCOINTERMEDIO<1> (Predeterminado)
- ▶ TFM-MV-NW_01-16-00_ASSY-CADENASUPERIORARCOINTERMEDIO<2> (Predeterminado)

Figura 69: Lista de sub-ensamblajes que forman el ensamblaje general 01-00-00, del modelo digital de la máquina de vapor de Newcomen.

5.6. Realización de las piezas CAD adicionales para la máquina de Watt y superposición de éstas sobre el modelo de la máquina de Newcomen.

Como ya se mencionó en el Apartado 5.1, el modelo digital que se realiza en este trabajo para la máquina de *Watt* consta solamente de una superposición de los elementos principales que *Watt* añadió a la máquina de *Newcomen* para mejorar su rendimiento térmico. Debido a ello, los modelos que se han alcanzado para ambas máquinas son muy similares y, aquí, se procede a mostrar únicamente aquellos sub-ensamblajes que incluyen estos elementos adicionales.

Las piezas correspondientes al *cerramiento superior del cilindro principal* y a la *camisa térmica* que rodea al cilindro, fueron modeladas de la forma más sencilla posible para representar, simplemente, el cerramiento y encapsulamiento. Por otro lado, las piezas correspondientes al *condensador* fueron modeladas para representar el dibujo mostrado en la Figura 70.

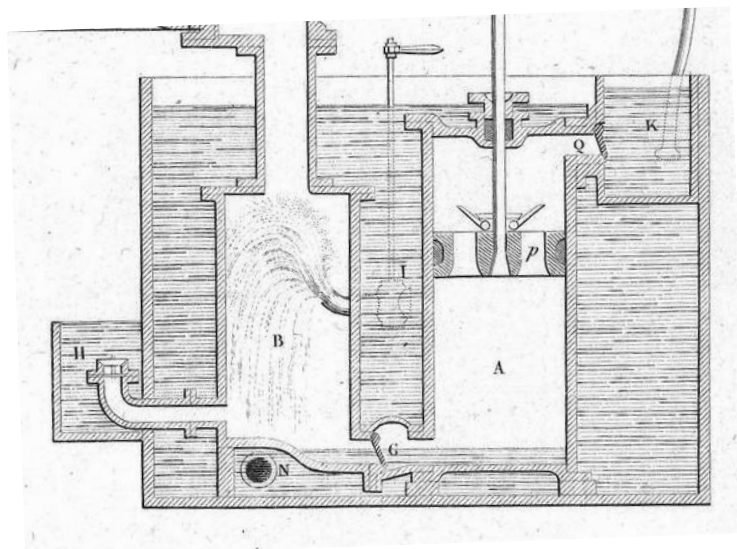


Figura 70: Dibujo de una vista de sección del condensador de la máquina de vapor de Watt [24].

5.6.1. Resultado de los sub-ensamblajes de la máquina de Watt que añaden los elementos de mejora térmica sobre la de Newcomen.

Estas imágenes muestran únicamente una vista general del sub-ensamblaje y otra vista de sección. Las vistas más específicas de ciertos componentes dentro de cada sub-ensamblaje, se podrán observar en el Capítulo 7, en el cual se desarrolla el funcionamiento de la máquina. Además, junto con la captura de cada sub-ensamblaje, se adjunta una imagen que muestra una lista de todas las piezas que forman cada uno de ellos (Figura 71 a Figura 79).

Debido a la gran cantidad de figuras que se muestran a continuación, primero se muestra la Tabla 2, la cual recoge el número de sub-ensamblaje junto con su nombre, el número de figura que representa la geometría de cada sub-ensamblaje y el número de figura que representa cada lista de piezas que forma cada sub-ensamblaje.

Tabla 2: Resumen de las figuras que muestran los sub-ensamblajes generados para el modelo digital de la máquina de Watt y que contienen elementos añadidos sobre la máquina de Newcomen.

Número y Nombre de sub-ensamblaje	Número de figura de geometría	Número de figura de lista de componentes
01-01-00: Cilindro Principal	Figura 71	Figura 72
01-06-00: Condensador	Figura 73	Figura 74 y Figura 75
01-16-00: Tubería de Vaciado del Vapor de la parte Superior del cilindro principal al condensador	Figura 76	Figura 77
01-17-00: Tubería de Vaciado del Vapor de la parte Inferior del cilindro principal al condensador	Figura 78	Figura 79

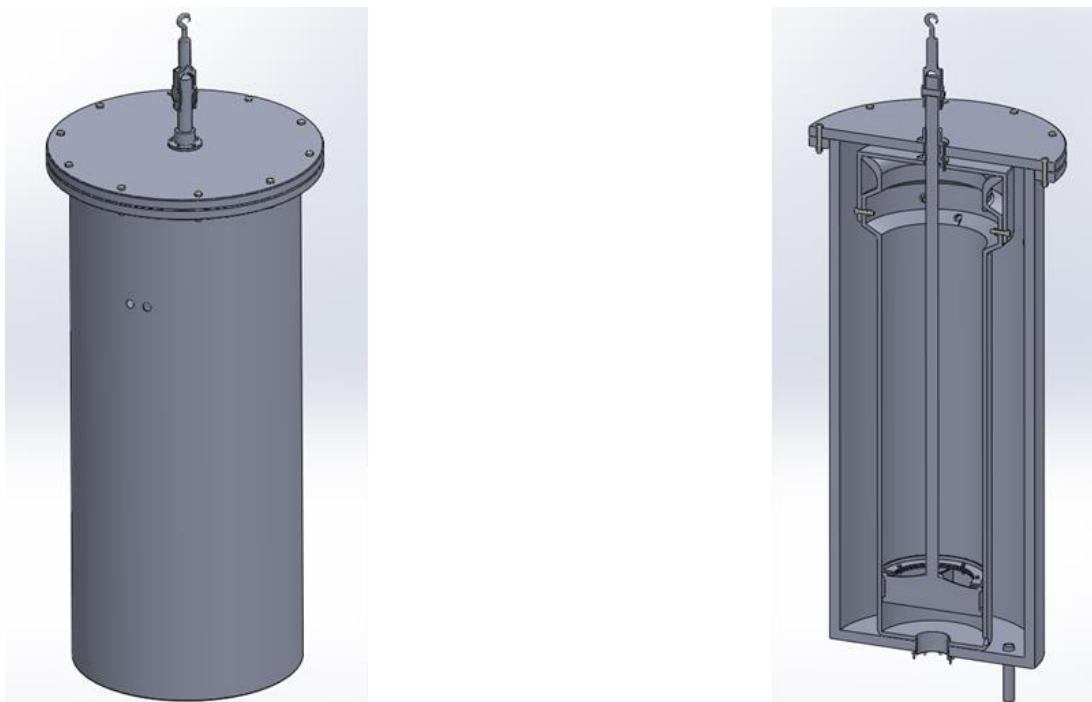


Figura 71: Sub-ensamblaje 01-01-00, respectivo al Cilindro Principal, con cerramiento superior y encapsulamiento por camisa térmica, de la máquina de vapor de Watt. Vista general completa (izquierda) y vista general de sección (derecha).

- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-01-01_PART-Cilindro<1> -> (Predeterminado) <<Pred
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-01-02_PART-CilindroTuboVapor<1> (Predeterminado) <
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-01-03_PART-CilindroPistónCuerpo<1> (Predeterminado)
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-01-04_PART-CilindroPistónSelloSuperior<1> (Predetermi
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-01-05_PART-CilindroPistónEnganche<1> (Predeterminad
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-01-06_PART-CilindroPistónEnganchePasador<1> (Predete
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-01-07_PART-CilindroPistónEnganchePasadorPin<1> (Def:
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-01-08_PART-CilindroTapaderaCierrePrimero<1> (Predete
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-01-09_PART-CilindroSelloTapaderaCierrePrimero<1> (Pre
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-01-10_PART-CilindroCamisaTermica<1> ->? (Predetermi
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-01-11_PART-CilindroBridaCamisaTermica<1> (Predeterm
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-01-12_PART-CilindroCamisaTermicaTapadera<1> (Prede
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-01-13_PART-CilindroSelloTapaderaCierreSegundo<1> (Pi
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-01-14_PART-CilindroConexionCalderaCamisaTermica<1>

Figura 72: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-01-00, respectivo al Cilindro Principal.

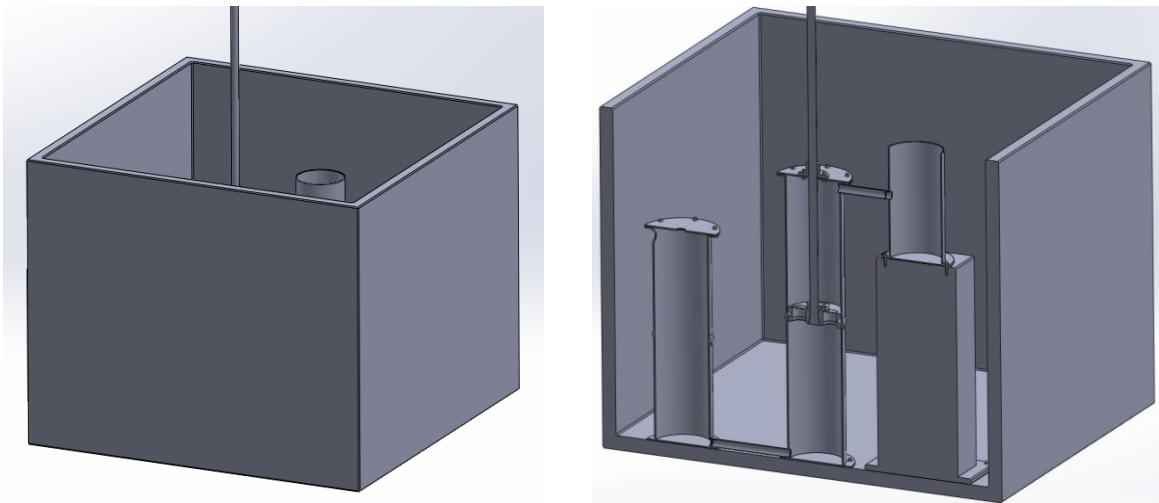


Figura 73: Sub-ensamblaje 01-06-00, respectivo al Condensador de la máquina de vapor de Watt. Vista general completa (izquierda) y vista general de sección (derecha).

- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-06-01_PART-BañeraDeRefrigeracion<1> -> (Predetermi
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-06-02_PART-CilindroCondensador<1> (Predeterminado) <
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-06-03_PART-CilindroCondensadorTapadera<1> (Predeterm
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-06-04_PART-CilindroBombaDeVacio<1> (Predeterminado)
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-06-05_PART-CilindroBombadeVacioTapadera<1> (Predete
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-06-06_PART-TuberiaCondensadorBombaVacio<1> (Predet
- ▶ (-) TFM-MV-WT_01-06-07_PART-PistonCuerpo<1> (Predeterminado) <<Pre
- ▶ (-) TFM-MV-WT_01-06-08_PART-PistonBarra<1> (Predeterminado) <<Prede
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-06-09_PART-PistonSelloBarra<1> (Predeterminado) <<Pre
- ▶ (-) TFM-MV-WT_01-06-10_PART-PistonBaseParaCompuertas<1> (Predeterr
- ▶ (-) TFM-MV-WT_01-06-11_PART-PistonPasadorParaCompuertas<1> (Predet
- ▶ (-) TFM-MV-WT_01-06-11_PART-PistonPasadorParaCompuertas<2> (Predet
- ▶ (-) TFM-MV-WT_01-06-12_PART-PistonCompuertas<1> (Predeterminado) <
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-06-13_PART-AltarParaDepositoSalida<1> (Predeterminad
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-06-14_PART-DepositoDeSalida<1> (Predeterminado) <<P
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-06-15_PART-TuberiaBombaDeVacioDepositoDeSalida<1>
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-06-16_PART-ValvulaTuberiaCondensador<1> (Predetermin
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-06-16_PART-ValvulaTuberiaCondensador<2> (Predetermin
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-06-17_PART-ValvulaTuberiaCondensadorEje<1> (Predeterr
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-06-17_PART-ValvulaTuberiaCondensadorEje<2> (Predeterr

Figura 74: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-06-00, respectivo al Condensador.











- ▶   TFM-MV-WT_01-06-18_PART-ValvulaTuberiaCondensadorBridaTope<1> (Pr
- ▶   TFM-MV-WT_01-06-18_PART-ValvulaTuberiaCondensadorBridaTope<2> (Pr
- ▶   TFM-MV-WT_01-06-19_PART-ValvulaTuberiaCondensadorEscotilla<1> (Prec
- ▶   TFM-MV-WT_01-06-19_PART-ValvulaTuberiaCondensadorEscotilla<2> (Prec
- ▶   (-) TFM-MV-WT 01-06-20 PART-GanchoPistonVicia<1> (Predeterminado) <

Figura 75: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-06-00, respectivo al Condensador (continuación).

En los siguientes dos sub-ensamblajes (Figura 76 y 77 para el sub-ensamblaje 01-16-00 y Figura 78 y 79 para el sub-ensamblaje 01-17-00) se puede apreciar que cada uno de ellos contiene únicamente una pieza. Aunque no parezca intuitivo, se ha procedido de esta forma puesto que el ensamblaje general (01-00-00, mostrado en la Figura 80 a Figura 82) únicamente puede contener sub-ensamblajes y no piezas sueltas, siguiendo la *Metodología de Diseño* establecida en la introducción del Capítulo 5.

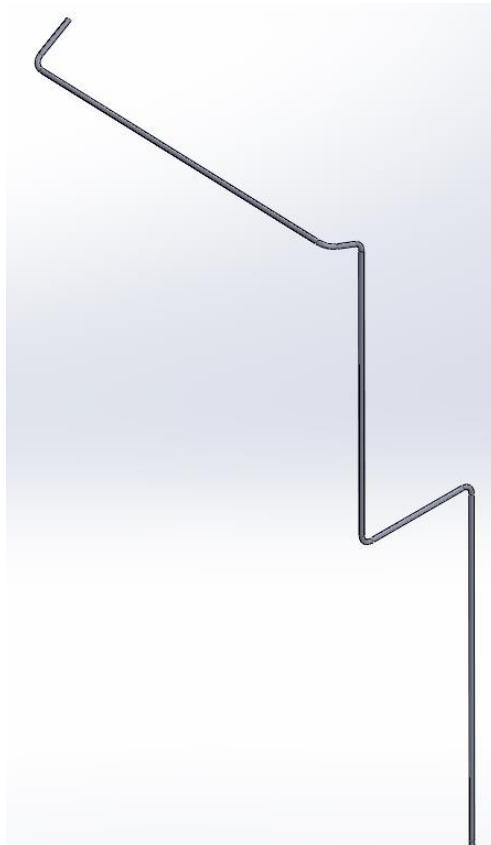


Figura 76: Sub-ensamblaje 01-16-00, respectivo a la Tubería de Vaciado del Vapor de la parte Superior del Cilindro al Condensador de la máquina de vapor de Watt. Vista general completa.



- ▶   (f) TFM-MV-WT_01-16-01_PART-TuberíaSuperiorCilindroCodensador<1>

Figura 77: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-16-00, respectivo a la Tubería de Vaciado de la parte Superior del Cilindro al Condensador.

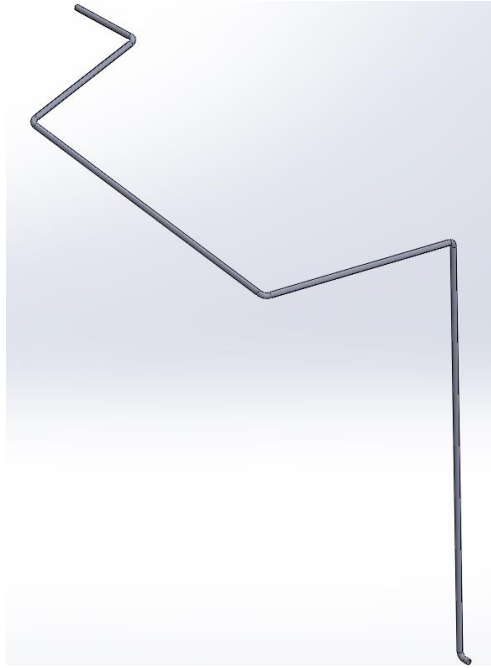


Figura 78: Sub-ensamblaje 01-17-00, respectivo a la Tubería de Vaciado del Vapor de la parte Inferior del Cilindro al Condensador de la máquina de vapor de Watt. Vista general completa.

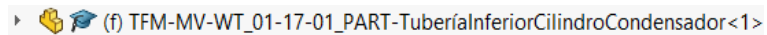


Figura 79: Lista de piezas que forman el sub-ensamblaje 01-17-00, respectivo a la Tubería de Vaciado de la parte Inferior del Cilindro al Condensador.

5.6.2. Resultado del ensamblaje general completo de la máquina de Watt.

En este capítulo se incluyen imágenes que muestran únicamente tres vistas del ensamblaje general: una completa (Figura 80) y otras dos de sección (Figura 81 y Figura 82). Mientras que en la Figura 81 se puede observar una vista de sección media del edificio, la Figura 82 muestra la vista de sección específica para el condensador. En el Capítulo 7, durante el estudio funcional de la máquina, se podrán observar algunas vistas más específicas de ciertos componentes. Además, se adjunta una captura que muestra una lista de todos los sub-ensamblajes que forman el ensamblaje general (Figura 83).

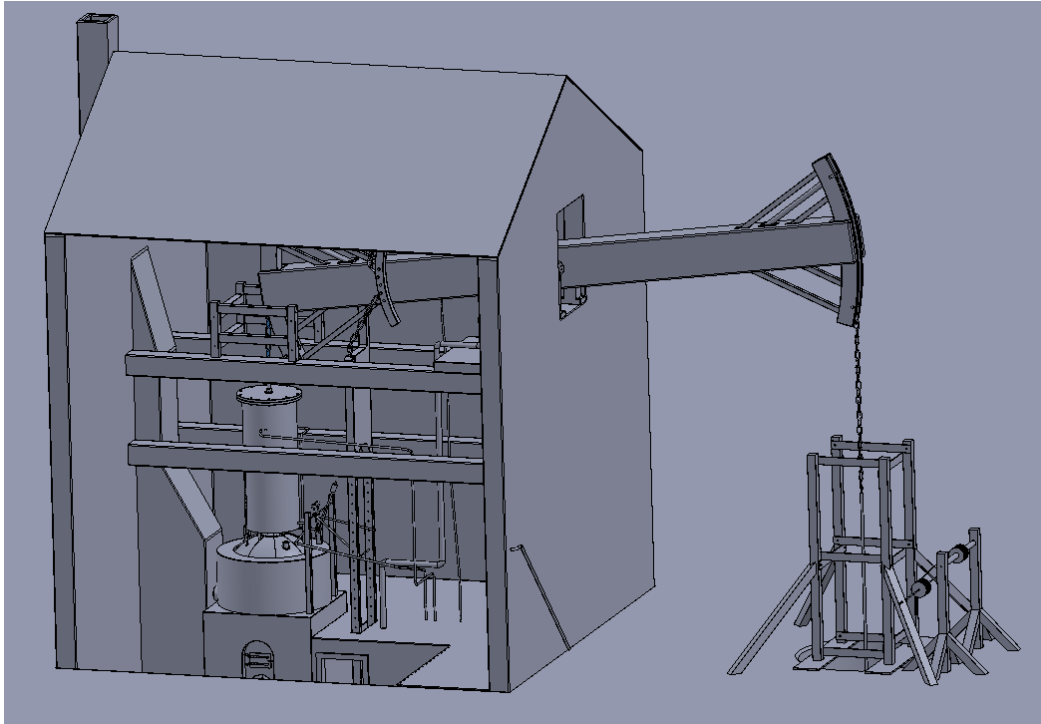


Figura 80: Ensamblaje general de la máquina de vapor de Watt, 01-00-00. Vista general completa.

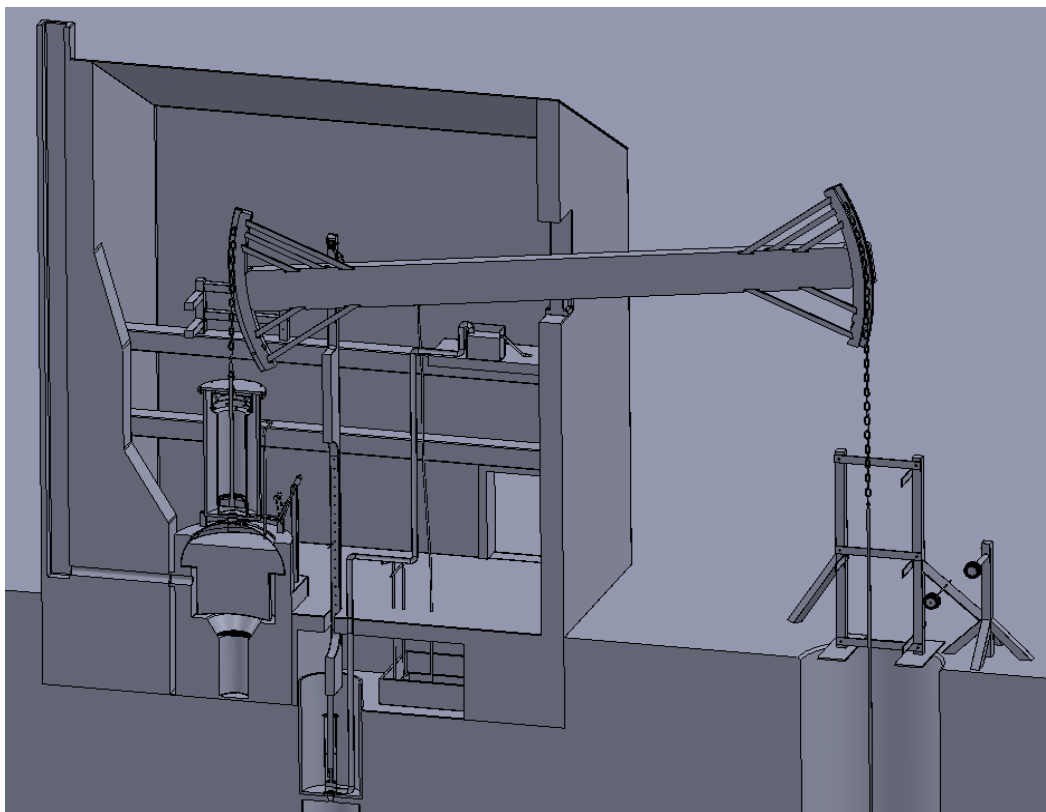


Figura 81: Ensamblaje general de la máquina de vapor de Watt, 01-00-00. Vista general de sección central.

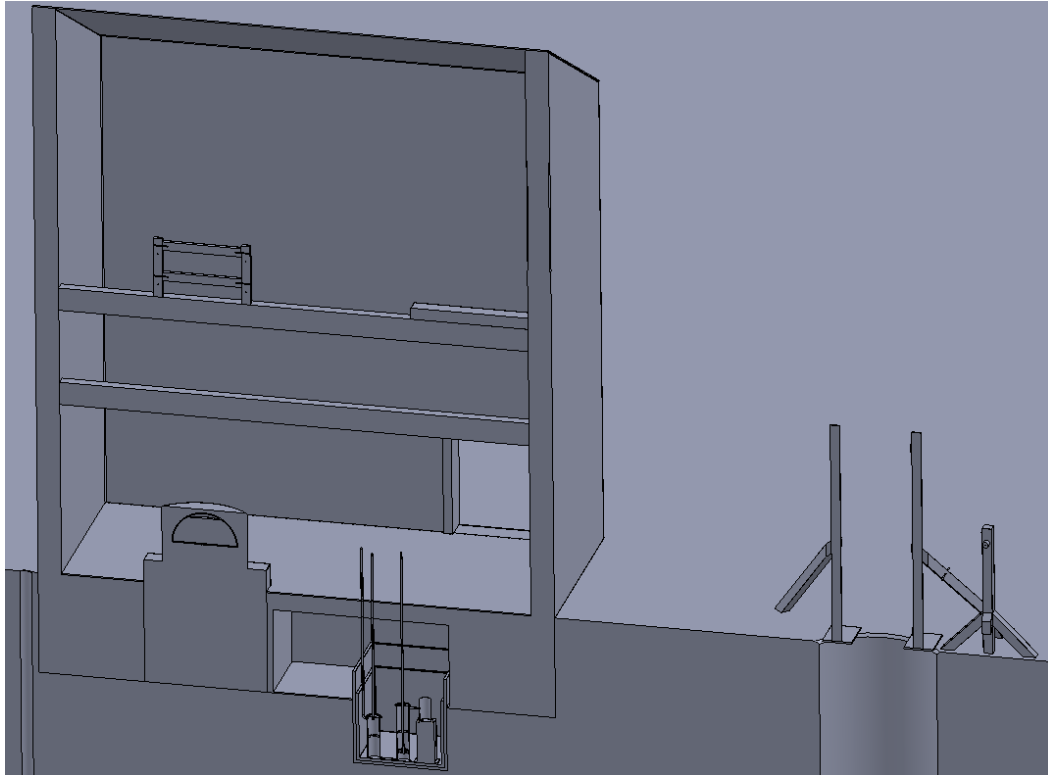


Figura 82: Ensamblaje general de la máquina de vapor de Watt, 01-00-00. Vista general de sección del condensador.

- ▶ TFM-MV-WT_01-01-00_ASSY-CILINDROPRINCIPAL<3> (Predeterminado) <Estado de visualizaciór
- ▶ TFM-MV-WT_01-02-00_ASSY-CALDERA<2> (Predeterminado) <Estado de visualización-1>
- ▶ TFM-MV-WT_01-03-00_ASSY-CASA<1> (Predeterminado) <Estado de visualización-1>
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-04-00_ASSY-VIGAELEVADORA<1> (Predeterminado) <Estado de visualizaciór
- ▶ TFM-MV-WT_01-05-00_ASSY-BOMBEOINTERIORCASA<1> (Predeterminado) <Estado de visualiza
- ▶ TFM-MV-WT_01-06-00_ASSY-CONDENSADOR<1> (Predeterminado) <Estado de visualización-1>
- ▶ TFM-MV-WT_01-07-00_ASSY-VALVULADEVAPOR<3> (Predeterminado) <Estado de visualización-
- ▶ TFM-MV-WT_01-08-00_ASSY-SISTEMATUBERIAMAESTRAYRAMAS<1> (Predeterminado) <Estado
- ▶ TFM-MV-WT_01-09-00_ASSY-TUBERIADESAGUEDEPOSITOSUPERIOR<1> (Predeterminado) <Esta
- ▶ TFM-MV-WT_01-10-00_ASSY-TUBERIAENTRADAVAPORSUPERIORCILINDRO<1> (Predeterminado
- ▶ TFM-MV-WT_01-11-00_ASSY-EXTERIOREDIFICIO_V1-SinEngancheCuerdaPozo<2> (Predeterminac
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-12-00_ASSY-CADENALADOINTERIOR_V0-CadenaEnDetalle<1> (Predetern
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-13-00_ASSY-CADENALADOEXTERIOR_V0-CadenaEnDetalle<1> (Predeterr
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-14-00_ASSY-CADENAINFERIORARCOINTERMEDIO<1> (Predeterminado) ·
- ▶ (f) TFM-MV-WT_01-15-00_ASSY-CADENASUPERIORARCOINTERMEDIO<1> (Predeterminado)
- ▶ TFM-MV-WT_01-16-00_ASSY-TUBERIASALIDAVAPORSUPERIORCILINDROCONDENSADOR<2>
- ▶ TFM-MV-WT_01-17-00_ASSY-TUBERIASALIDAVAPORINFERIORCILINDROCONDENSADOR<1>

Figura 83: Lista de sub-ensamblajes que forman el ensamblaje general 01-00-00, del modelo digital de la máquina de vapor de Watt.

6. Post-modelado de las máquinas de Newcomen y de Watt.

Una vez se finaliza la fase del modelado en SolidWorks de las piezas y los ensamblajes que forman los modelos digitales de ambas máquinas, se procede a realizar sus renderizados realistas. Para alcanzar este objetivo, se han realizado las siguientes tareas:

- 1) Asignación de los materiales a todas las piezas de los modelos.
- 2) Aplicación de las apariencias reales a todas las piezas pertenecientes a los ensamblajes generales: *NW_01-00-00* y *WT_01-00-00*.
- 3) Realización de los renderizados finales de las máquinas modeladas.

6.1. Asignación de los materiales a las piezas CAD diseñadas.

El primer paso para obtener un modelo digital de cada máquina, que incluya las apariencias reales de la misma, es el de otorgar a cada una de las piezas los materiales a partir de los cuales fueron fabricadas.

Ello ha sido realizado, primero, siguiendo la información obtenida en las diferentes fuentes. Luego, para las piezas para las cuales no se ha encontrado información alguna acerca de sus materiales, éstos han sido asumidos teniendo en cuenta la tecnología y las prácticas comunes de los años en los que fueron construidas ambas máquinas.

Además, mientras la mayoría de los materiales asignados están incluidos en la biblioteca de materiales predeterminada de *SolidWorks*, algunos tuvieron que ser introducidos a mano como materiales personalizados. Éste fue el caso, por ejemplo, para la asignación del material *Cuero*, cuyas propiedades definidas fueron las que se observan en la Tabla 3.

Tabla 3: Propiedades otorgadas al material personalizado "Cuero".

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	2000	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.394	N/D
Módulo cortante	318.9	N/mm ²
Densidad de masa	1020	kg/m ³
Límite de tracción	30	N/mm ²
Límite de compresión		N/mm ²
Límite elástico		N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica		/K
Conductividad térmica	0.2256	W/(m·K)
Calor específico	1386	J/(kg·K)
Cociente de amortiguamiento del material		N/D

En la Tabla 4 se resumen todos los materiales que han sido utilizados en los modelos digitales realistas, las piezas a las cuales han sido otorgados y la justificación de estas asignaciones:

Tabla 4: Resumen de los materiales utilizados en los modelos digitales de las máquinas, junto con sus justificaciones.

MATERIAL	COMPONENTES A LOS QUE APLICA	JUSTIFICACIÓN
Acero	Cadenas	LTC Rolt & JS Allen[14]
Agua	Volúmenes en los interiores de la caldera y de los depósitos	-
Balsa (Madera)	Camisa de vapor de la máquina de Watt	Muy baja conductividad térmica, siguiendo las indicaciones de Watt en su patente
Caoba	Tambor Giratorio del mecanismo de elevación manual de la mina	Simplemente para obtener contraste con el entorno
	Marcos de las puertas del edificio	Simplemente para obtener contraste con el entorno
Cedro	Cubos de desagüe en la mina	Muy resistente al agua
Cobre	Cuerpo principal de la caldera	LTC Rolt & JS Allen
Cuero	Sellos de los pistones	LTC Rolt & JS Allen
Hierro (Fundición Gris)	Pistones	LTC Rolt & JS Allen
	Sistema de Tuberías	Tecnología de la época
	Válvulas Antirretorno	Tecnología de la época
	Cilindro de la bomba principal	LTC Rolt & JS Allen
	Cilindros del Condensador de la máquina de Watt	Asumido mismo material que para cilindro de la bomba
Hierro Dúctil	Perfilería metálica	Práctica común de la época
	Válvulas de Vapor y de Inyección	LTC Rolt & JS Allen
	Compuerta de combustible de la caldera	Práctica común de la época
	Ejes	LTC Rolt & JS Allen
Ladrillo Convencional	Muros del edificio	-
Ladrillo Térmico	Envoltorio de la Caldera	LTC Rolt & JS Allen
Latón	Cilindro Principal	LTC Rolt & JS Allen
	Tapadera superior de la caldera	LTC Rolt & JS Allen
	Compuerta de la válvula de vapor	LTC Rolt & JS Allen
	Giratorio de la compuerta de la válvula de vapor	LTC Rolt & JS Allen
Latón de alto plomo	Cúpula de la caldera	LTC Rolt & JS Allen
	Cilindro de la boya de la válvula de inyección	Asumido mismo material que para la cúpula de la caldera
Plomo Puro	Peso inclinador de la válvula de vapor	LTC Rolt & JS Allen
Roble	Viga Elevadora	LTC Rolt & JS Allen
	Vástago vertical de bombeo	LTC Rolt & JS Allen
	Suelo del edificio	-
	Vigas del edificio	-
	Perfilería de la estructura del mecanismo de elevación manual de la mina	LTC Rolt & JS Allen
Teca	Bañera de refrigeración del condensador	Muy baja conductividad térmica y alta resistencia al agua
Teja	Tejas de la cubierta del edificio	Material predeterminado en SolidWorks

6.2. Aplicación de las apariencias reales de los materiales a las piezas CAD diseñadas.

Prácticamente todas las apariencias reales añadidas a los modelos digitales son las correspondientes a las que *SolidWorks* da por defecto según el material que le ha sido otorgado a una pieza, aunque en ocasiones hubo que acceder a su biblioteca de “*Apariencias, escenas y calcomanías*” (Figura 84), para cambiar la apariencia predeterminada a otra que se ajustase mejor al material asignado.

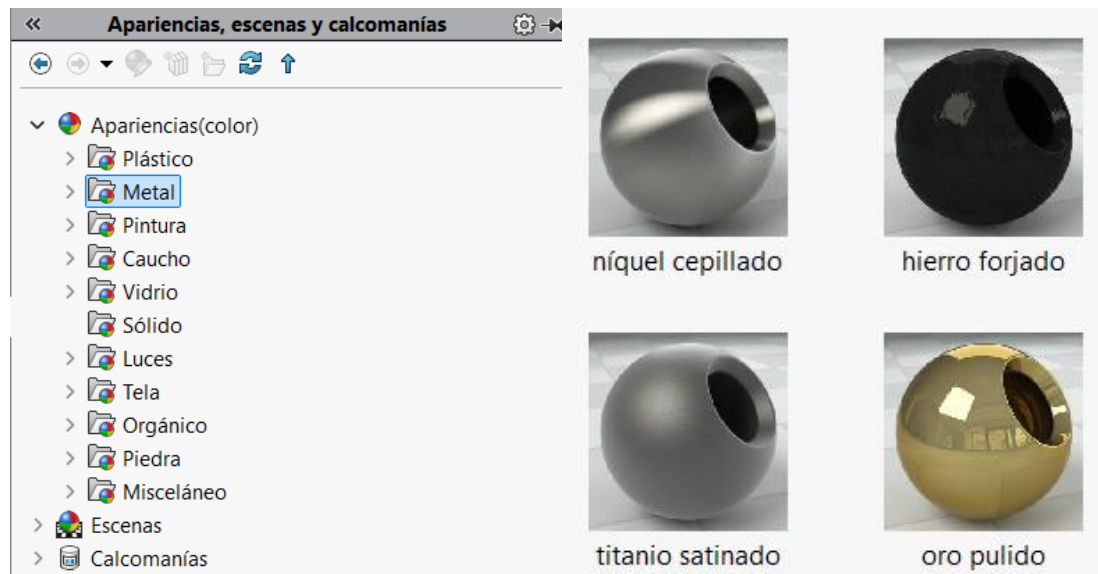


Figura 84: Interfaz de la biblioteca “*Apariencias, escenas y calcomanías*”, dentro de *SolidWorks*.

Estas apariencias predeterminadas del software, así como las que incluye en su biblioteca de apariencias, permiten obtener unos modelos digitales realistas satisfactorios, como se puede observar en las Figura 86 a 91.

La única apariencia adicional que no incluía la biblioteca de *SolidWorks*, y que por tanto hubo que añadir, fue la de las tejas de la cubierta del edificio. La imagen utilizada (Figura 85) para la apariencia de este componente se puede observar a continuación.



Figura 85: Imagen utilizada como apariencia real de las tejas de la cubierta del edificio [25].

Habiendo aplicado todas las apariencias reales de los materiales de todos los componentes de ambas máquinas, los modelos digitales resultantes para la máquina de Newcomen y la de Watt fueron los que se pueden observar en las Figura 86 a 88 y en las Figura 89 a 91, respectivamente.

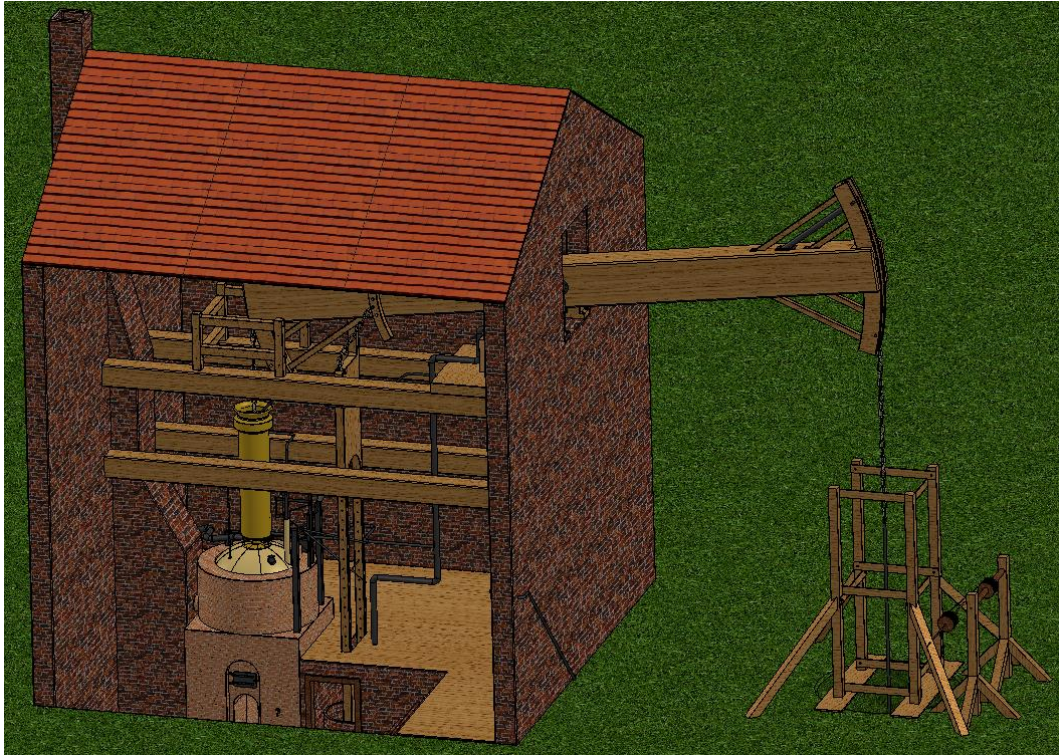


Figura 86: Ensamblaje general de la máquina de vapor de Newcomen, 01-00-00, con las apariencias realistas de los materiales. Vista general completa cercana.

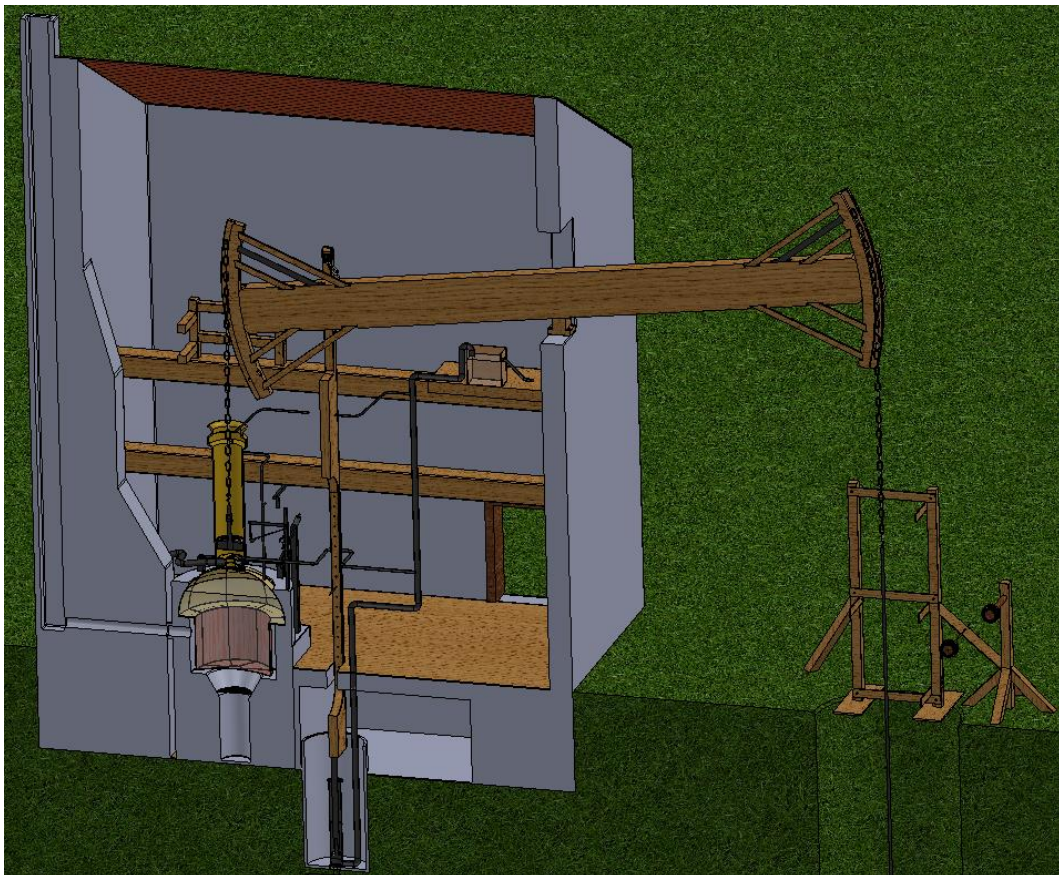


Figura 87: Ensamblaje general de la máquina de vapor de Newcomen, 01-00-00, con las apariencias realistas de los materiales. Vista general de sección cercana. *Nota:* Las apariencias de los ladrillos desaparecen en la vista de sección, debido a que éstas fueron asignadas a superficies, en lugar de a sólidos.



Figura 88: Ensamblaje general de la máquina de vapor de Newcomen, 01-00-00, con las apariencias realistas de los materiales. Vista general de sección lejana.

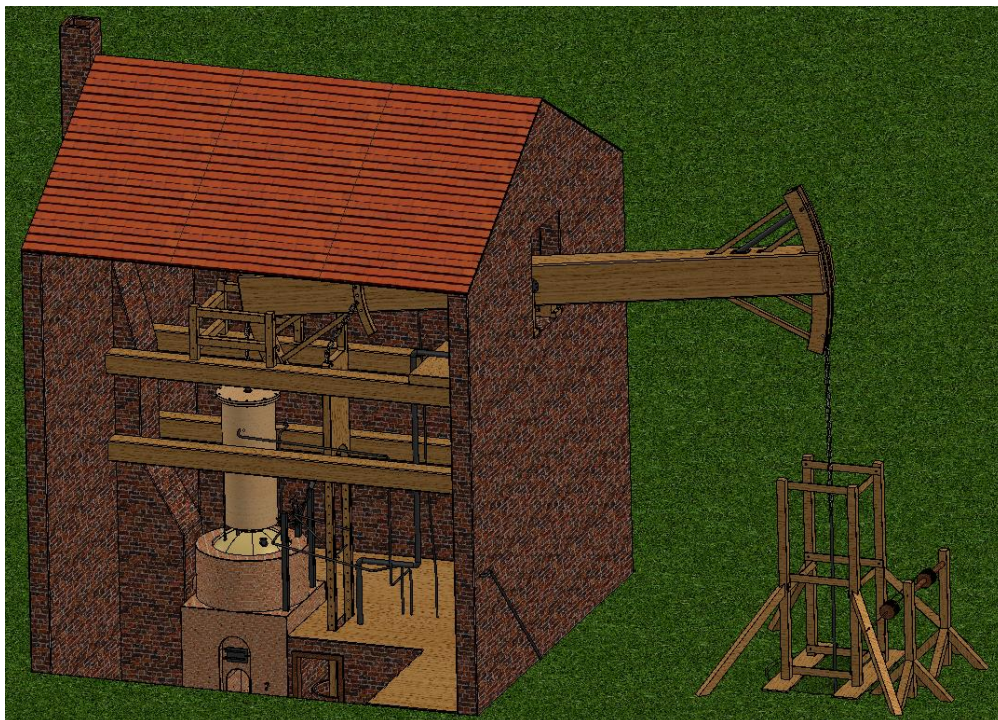


Figura 89: Ensamblaje general de la máquina de vapor de Watt, 01-00-00, con las apariencias realistas de los materiales. Vista general completa.

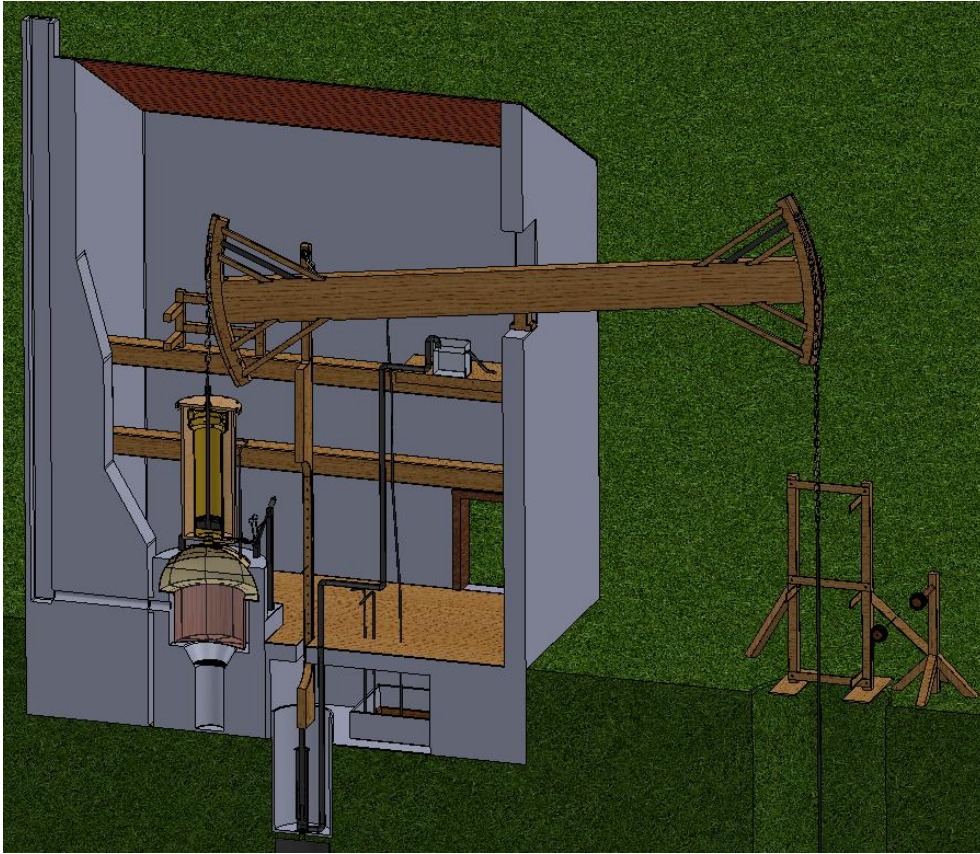


Figura 90: Ensamblaje general de la máquina de vapor de Watt, 01-00-00, con las apariencias realistas de los materiales. Vista general de sección central. *Nota:* Las apariencias de los ladrillos desaparecen en la vista de sección, debido a que éstas fueron asignadas a superficies, en lugar de a sólidos.

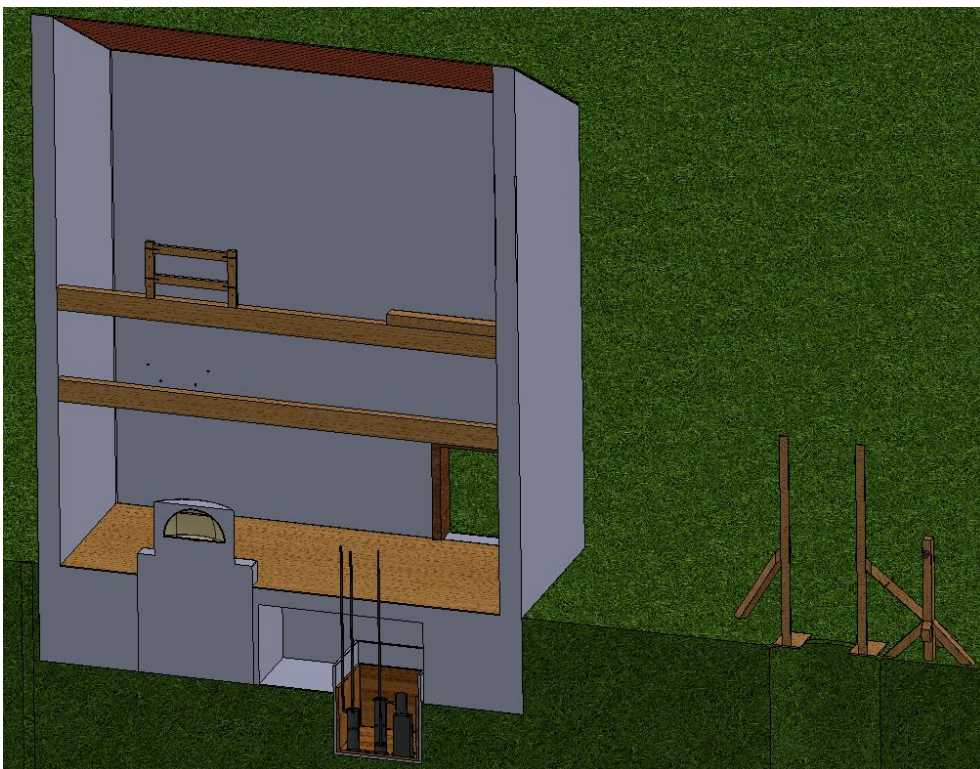


Figura 91: Ensamblaje general de la máquina de vapor de Watt, 01-00-00, con las apariencias realistas de los materiales. Vista general de sección del condensador.

6.3. Exposición de los renderizados finales de las máquinas modeladas.

Habiendo aplicado los correspondientes materiales y apariencias realistas a todas las piezas que conforman los ensamblajes generales de las máquinas de vapor de Newcomen y de Watt, se realizó un renderizado realista final, de cada máquina, con el fin de culminar la fase de post-modelado del proyecto presentado en esta memoria. La Figura 93 muestra el renderizado obtenido para el modelo digital de la máquina de vapor de Newcomen, mientras que la Figura 94 muestra el de la máquina de vapor de Watt.

Para ello, se ha utilizado el módulo de renderizado del propio programa SolidWorks, denominado “SolidWorks Visualize” (Figura 92).



Figura 92: Captura de la portada de iniciación del programa SolidWorks Visualize.

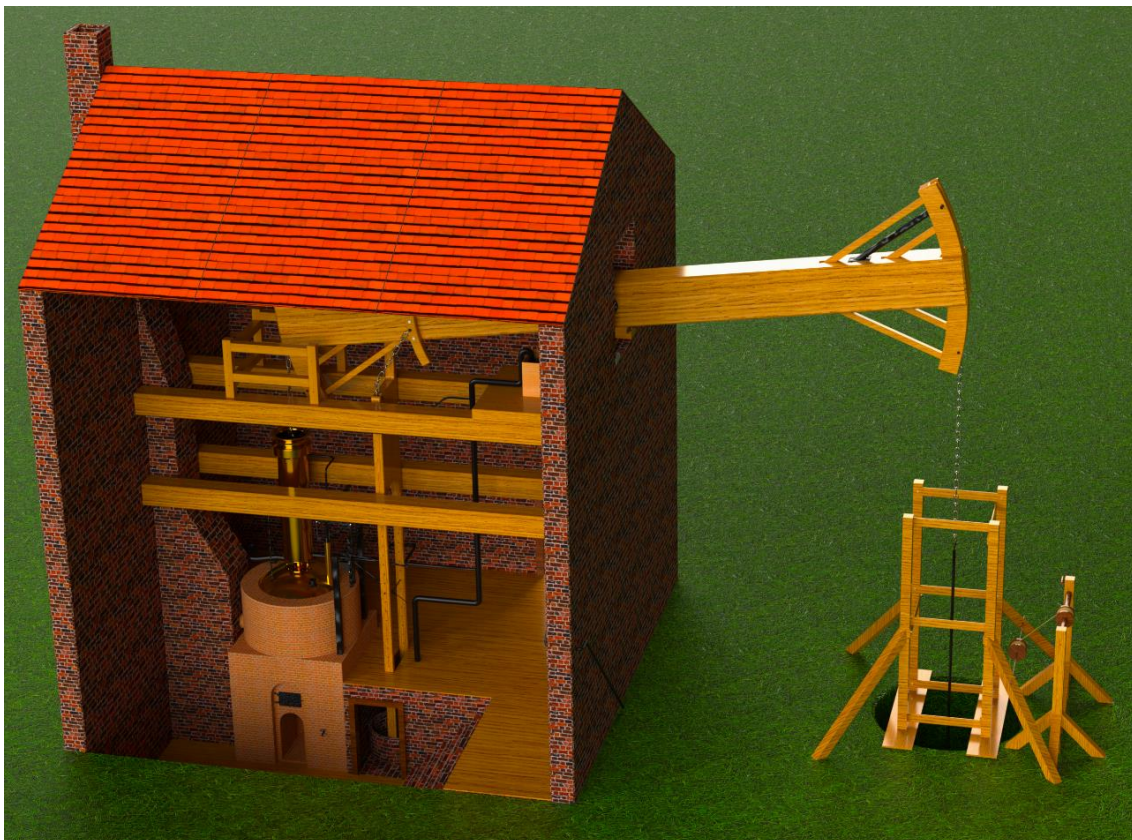


Figura 93: Renderizado realista final de la máquina de vapor de Newcomen modelada.

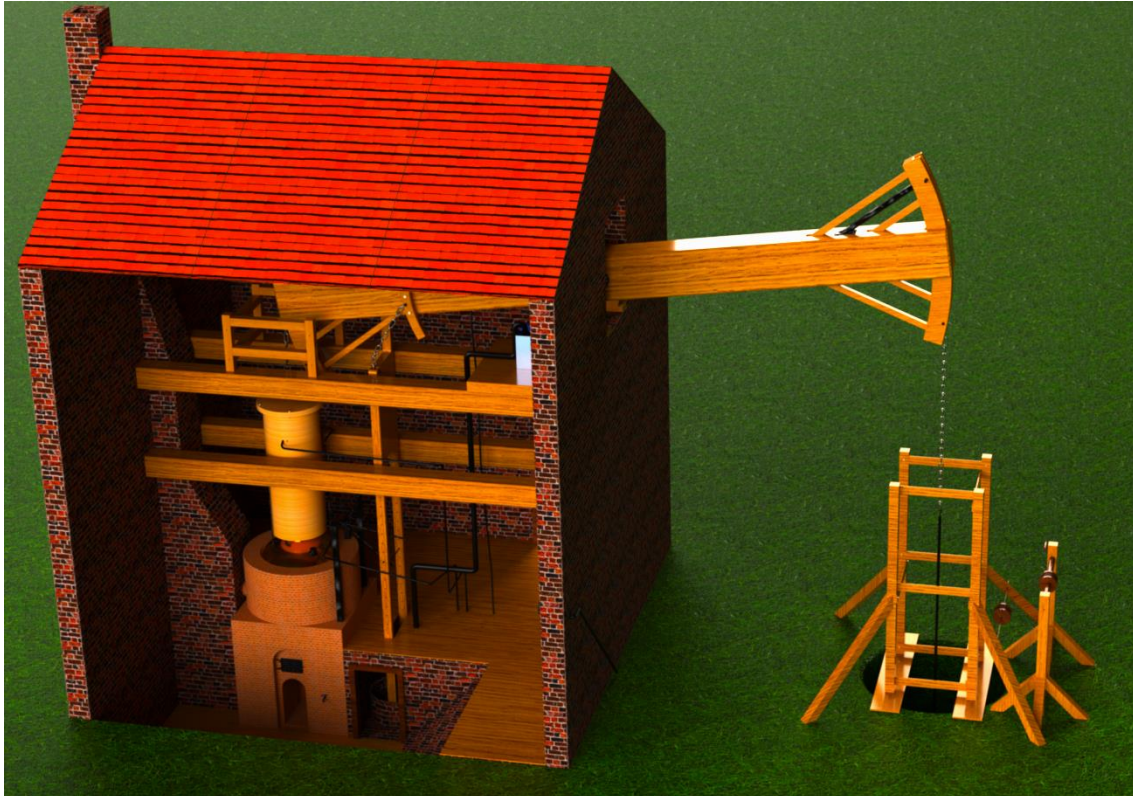


Figura 94: Renderizado realista final de la máquina de vapor de Watt modelada.

6.4. Conversión de los archivos *SolidWorks* a archivos *STEP* para su exportación al museo virtual.

Por último, una vez finalizados los modelos digitales de las máquinas de vapor de Newcomen y de Watt, hubo que exportar todos los archivos *SolidWorks* generados (*PART* y *ASSY*) a archivos tipo *STEP*, para que el responsable de la importación de los modelos al *Museo Virtual* pueda llevar a cabo dicho cometido, en el caso en el que no disponga del software *SolidWorks*.

Mientras los archivos tipo *PART* y tipo *ASSY* son compatibles únicamente con el programa *CAD SolidWorks*, los archivos tipo *STEP* lo son con prácticamente todos los programas de visualización de modelos tridimensionales y de diseño *CAD*.

6.5. Modelado digital de las máquinas de vapor. Esquema de Procedimiento.

A continuación, en la Figura 95, se muestra un esquema del procedimiento que se ha seguido a lo largo del modelado de las máquinas de vapor de Newcomen y de Watt, desde los trabajos preparatorios (Capítulo 4) hasta los de post-modelado (Capítulo 6). Este esquema permite una fácil visualización del proceso de diseño seguido, permitiendo así un mayor grado de comprensión por parte del lector de la presente memoria.

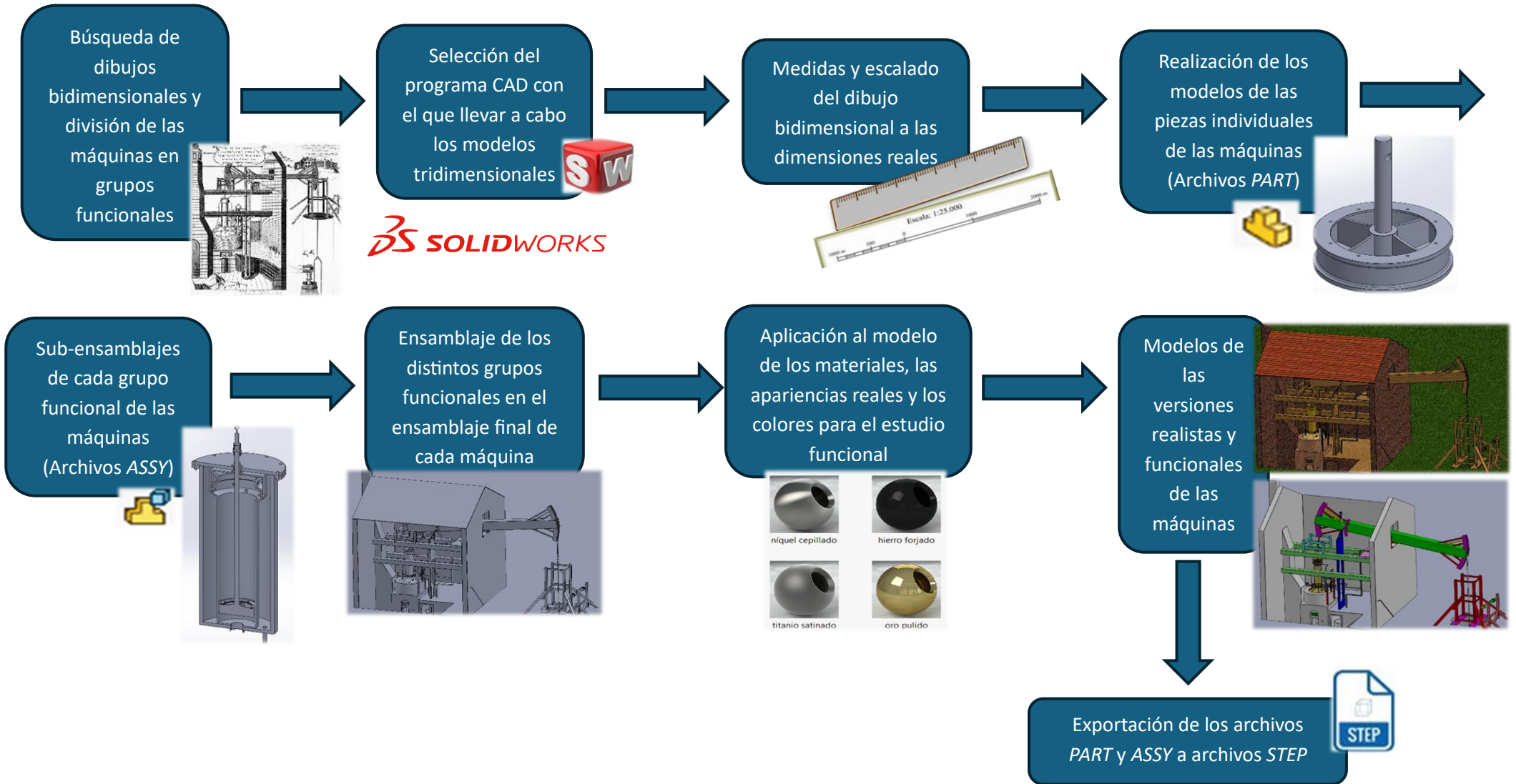


Figura 95: Esquema del procedimiento de diseño seguido a lo largo del proyecto.

7. Estudio de funcionalidad de las máquinas de vapor.

En esta sección de la presente memoria se procede a exponer el funcionamiento de las máquinas de vapor de *Thomas Newcomen* y de *James Watt*, aportando, junto a las descripciones, ilustraciones de los modelos que se han realizado, con el objetivo de facilitar la correcta comprensión del funcionamiento de ambas máquinas.

Puesto que el modelo que se ha realizado para la máquina de *Watt* consiste únicamente de los componentes adicionales que se añadieron sobre la de *Newcomen* para mejorar su rendimiento térmico, aquí se procede a explicar solamente la funcionalidad de dichos elementos añadidos: la camisa térmica del cilindro y el condensador. Además, *Watt* incorporó a este último una bomba de vacío para desalojar el agua que en él se acumulaba.

7.1. Preparación para el estudio de funcionalidad.

Para poder hacer un estudio funcional que se pueda entender de forma clara, los modelos digitales con apariencias realistas no permitirían la sencilla identificación de todos los elementos que componen las máquinas, ya que hay muchos componentes que tienen el mismo material y que están juntos unos de otros.

Por ello, se ha realizado una segunda versión de los modelos digitales, la cual consiste en una versión con las mismas piezas y ensamblajes que las de la versión realista, pero coloridas en tonos llamativos y diferenciadores (Figura 123 y 159). Es decir, se ha tratado de dar distintos colores a cada pieza que se encuentren cerca una de otra. De esta forma, todas ellas pueden ser fácilmente visibles e identificables, para el correcto entendimiento del estudio de funcionalidad.

Además, para estas versiones de los modelos utilizados para el estudio funcional, se han tenido que sustituir las cadenas de eslabones por unos simples cilindros que conectasen los pistones y vástagos con la viga elevadora (Figura 122). Esto se debe a que los modelos que incluyen las cadenas de eslabones, en SolidWorks, son estáticos, ya que no hay forma de ensamblar estas cadenas sin fijar la máquina en una posición fija. Luego, al tener como objetivo del estudio funcional el demostrar cómo se comportaba la máquina mientras ésta funcionaba, era preciso obtener un modelo que permitiese mover la máquina a sus distintas posiciones, dentro del entorno de trabajo de SolidWorks.

7.2. Estudio de funcionalidad de la máquina de *Newcomen*.

El funcionamiento de la máquina de vapor de *Newcomen* se puede dividir en dos fases. Primero, la **fase de carga**, que es la fase ascendente del pistón principal. Segundo, la **fase de potencia**, que es la fase descendente del pistón principal. A continuación, se expone el funcionamiento de la máquina durante éstas dos fases.

7.2.1. Fase de Carga.

Antes de arrancar la máquina, el operario de ésta debía asegurarse que la caldera tenía la cantidad de agua necesaria para generar el vapor deseado. Según el libro de *LTC Rolt y JS Allen* [14], el agua en el interior de la caldera tenía una altura de 4 pies y 4 pulgadas. La cúpula disponía de una escotilla por la cual introducir el agua y un medidor de la altura del agua que flotaba sobre la superficie de ésta, como si de una boya se tratase (Figura 96 y Figura 97). Además, el operario podía vaciar la caldera una cierta cantidad o en su totalidad, mediante la válvula manual de vaciado de la caldera (Figura 98).



Figura 96: Escotilla de llenado y medidor de la altura del agua, colocados sobre la cúpula de la caldera.

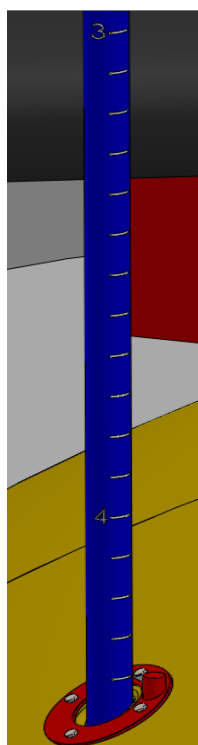


Figura 97: Detalle del medidor de agua de la caldera.

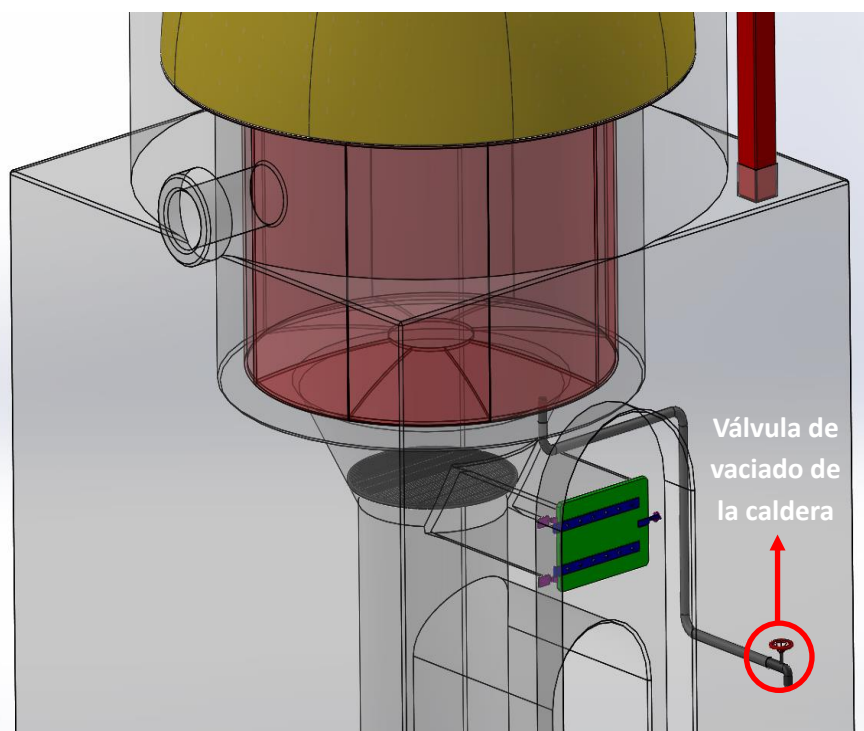


Figura 98: Válvula de vaciado de la caldera, junto con la tubería que va desde la base de la caldera hasta la salida de la válvula.

Una vez llena la caldera de agua, el operario abre la compuerta de la caldera (Figura 99) y deposita el combustible, el cual consistía en carbón, sobre el plato-rejilla (Figura 101). Después, se prende el carbón y el fuego generado calienta de forma directa la base de la caldera. Además, existe una cavidad entre la caldera y el ladrillo del encapsulado de la caldera para que los gases de la combustión del carbón calienten también sus superficies laterales, antes de ser expulsados del edificio a través de la chimenea (Figura 100). A medida que el carbón se consume, la ceniza restante cae desde el plato, a través de las rejillas, al depósito de ceniza (Figura 99), para que el operario pueda tener acceso a ésta y, así, extraerla.

Cabe destacar que cuando la máquina de Newcomen fue construida, las excelentes propiedades de transmisión térmica del cobre eran bien conocidas. Es por ello por lo que el cilindro de la caldera, que debía de recibir el calor y transmitirlo al agua de la caldera, estaba hecho de cobre.

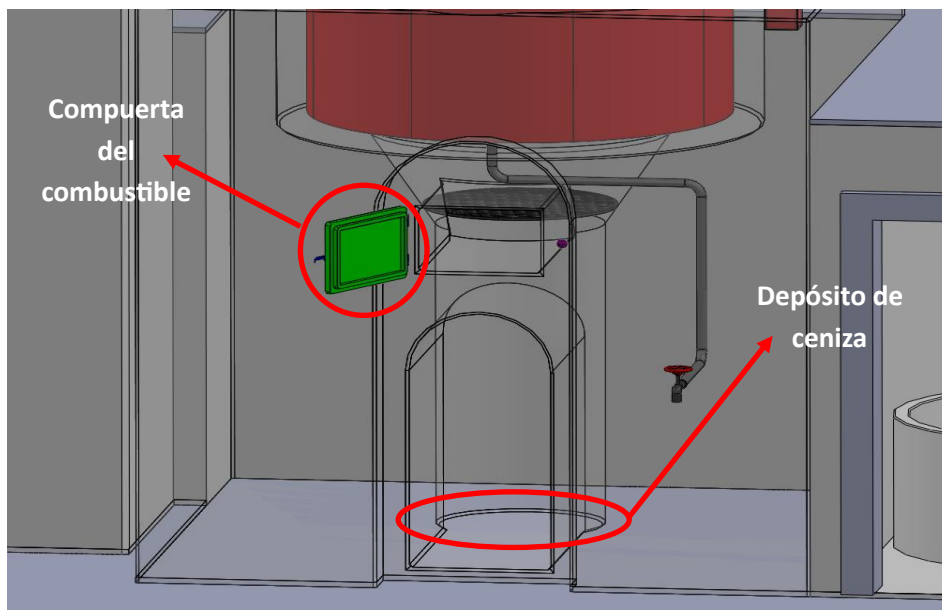


Figura 99: Apertura de la compuerta de introducción del carbón en la caldera y depósito de ceniza.

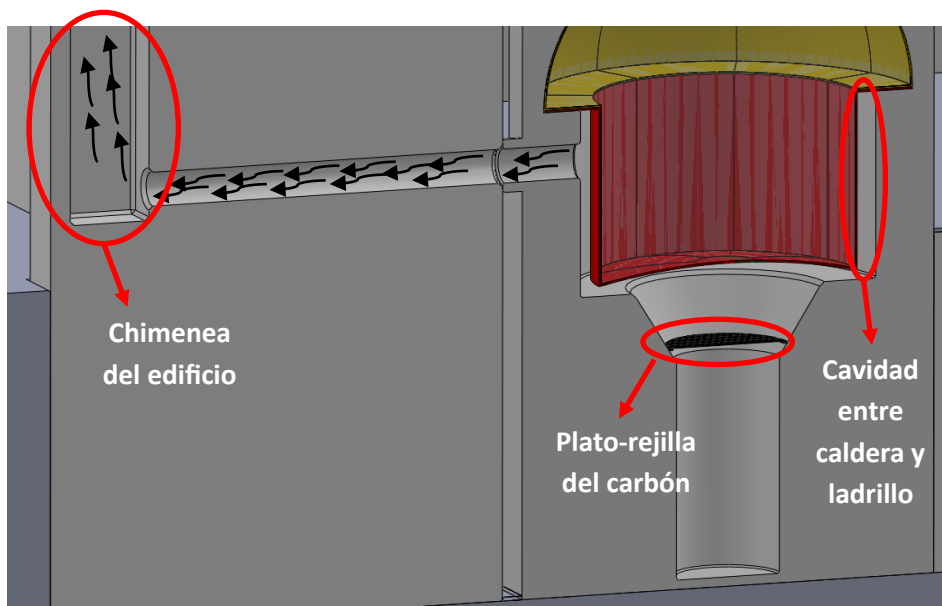


Figura 100: Vista de sección para mostrar el plato-rejilla donde se deposita el carbón, así como la cavidad entre el cilindro de la caldera y el ladrillo que la encapsula, y el flujo de los gases producto de la combustión del carbón.

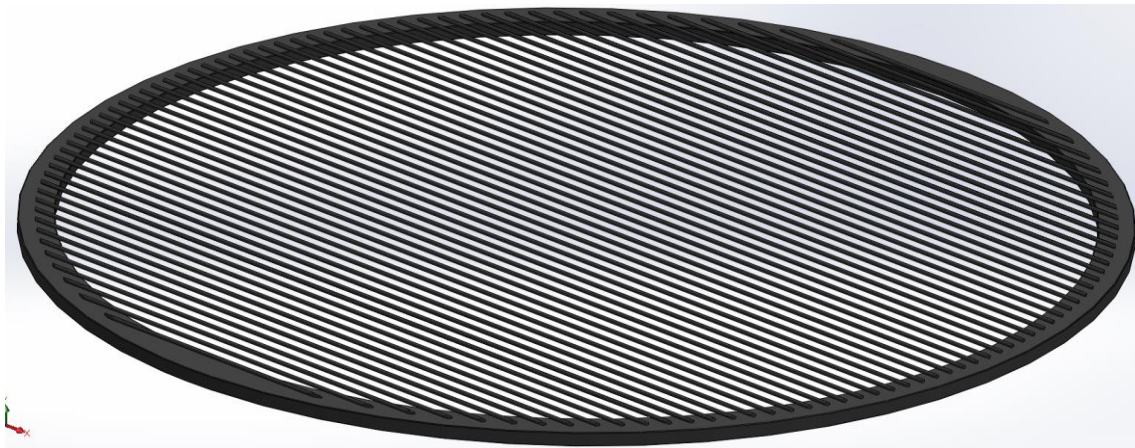


Figura 101: Detalle del plato-rejilla del carbón, en el cual se puede observar el hueco por el cual se cuele la ceniza producida.

A medida que el agua en el interior de la caldera se calienta, se genera el vapor que fluye desde la caldera hasta el cilindro principal, pasando por la tubería de conexión entre estos dos componentes (Figura 102), “cargando” así el cilindro de vapor (de ahí el nombre dado a esta fase del funcionamiento de la máquina), ya que la válvula de vapor está inicialmente abierta (Figura 103). El vapor, dentro del cilindro, ejerce una presión sobre la base del pistón principal de la máquina. Una vez se acumula una cierta cantidad de vapor debajo del pistón, la cual ejerza la suficiente presión sobre él, dará comienzo la carrera de subida del pistón a lo largo del cilindro.

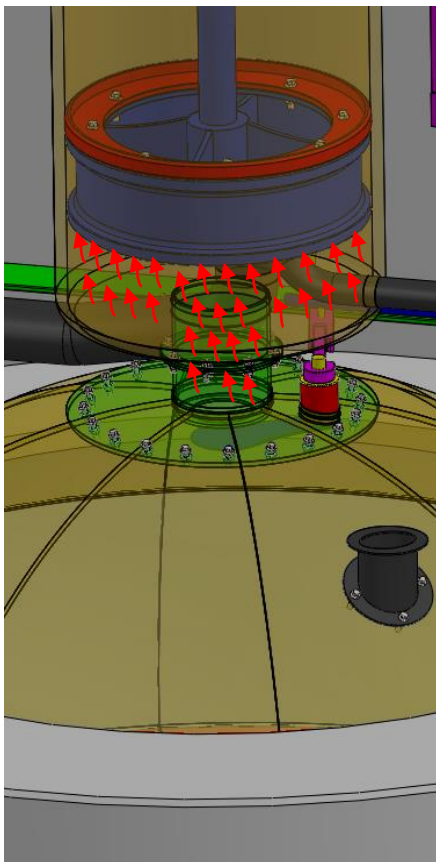


Figura 102: Flujo del vapor generado, cuando la compuerta de la válvula de vapor está abierta.

Aquí es conveniente recordar que la máquina de Newcomen es conocida también como “máquina de vapor atmosférica” debido a que el extremo superior del cilindro está abierto a la atmósfera. Esto significa que la presión ejercida sobre la parte superior del pistón es la correspondiente a la del entorno. En el libro de *LTC Rolt* y *JS Allen* [14] se detalla que la Presión Efectiva Media de la máquina es de $9,4 \text{ lb/in}^2$ (aproximadamente 65 kPa), lo cual es bastante menos que la presión atmosférica de, aproximadamente, 101 kPa . Por ende, el balance de presiones experimentado por el pistón siempre dará como resultado una fuerza resultante hacia abajo.

Conocido esto, el pistón no se desplaza hacia arriba únicamente por la acción del vapor, sino cuando el momento resultante experimentado en el eje de giro de la viga elevadora de la máquina haga que ésta gire de forma que tire del pistón y lo eleve. Por lo tanto, a la hora de diseñar la máquina se debieron tener en cuenta todas las masas que penden de la viga elevadora, las masas de agua a desplazar tanto por la bomba del edificio como por las de la mina, además de la generación de vapor de la caldera, con el objetivo de que el pistón se desplazase hacia arriba (Figura 104 y Figura 105).

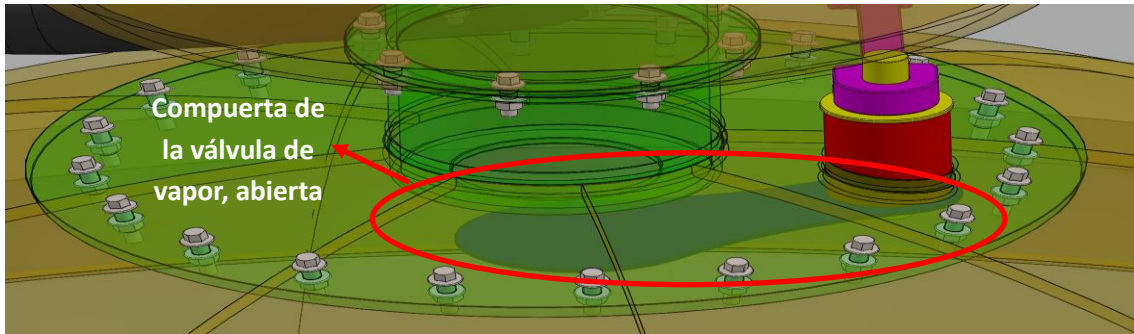


Figura 103: Detalle de la compuerta de la válvula de vapor, en su posición abierta.

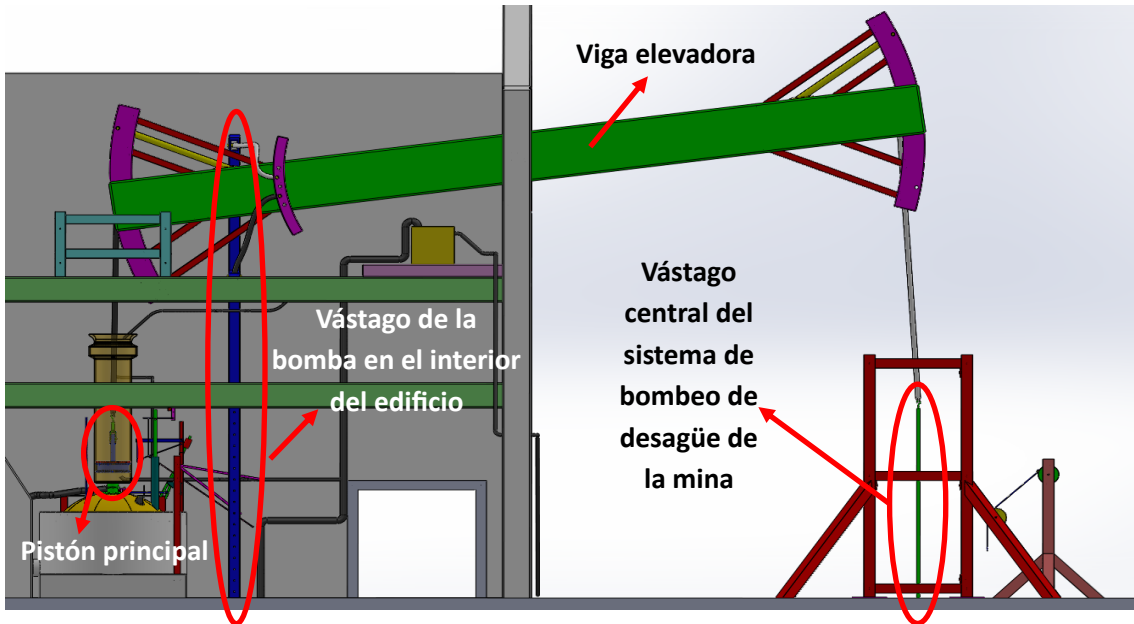


Figura 104: Viga elevadora y los elementos que cuelgan de ella, en sus posiciones iniciales de la fase de carga de la máquina.

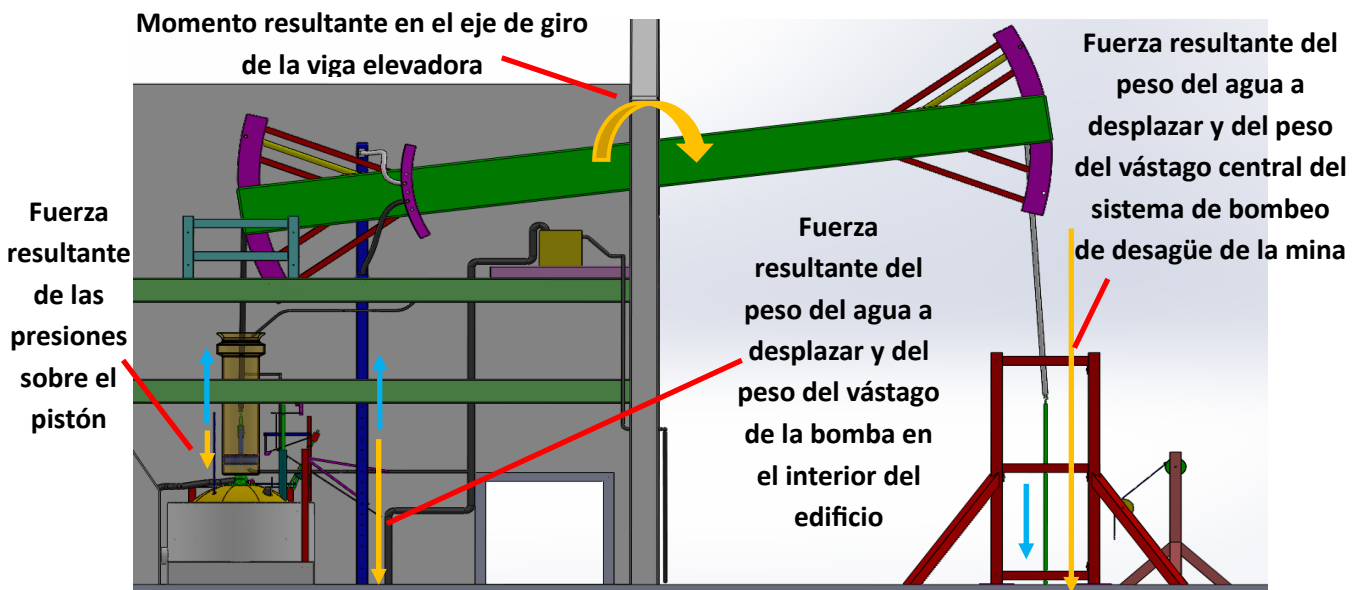


Figura 105: Fuerzas ejercidas sobre la viga elevadora (en naranja), debidas al balance de fuerzas entre el peso del volumen de agua a desplazar y los pesos de los elementos que cuelgan sobre la viga y al balance de presiones que actúan sobre el pistón principal, momento resultante sobre el eje de giro de la viga (en naranja) y desplazamientos de los elementos (en celeste), durante la fase de carga.

Al rotar la viga elevadora en sentido horario, esta desplaza también al vástago de la bomba del interior del edificio y, por ende, al pistón de la bomba hacia arriba, ya que éste está fijado a aquél (Figura 106 y Figura 107). Puesto que el cilindro de la bomba es colocado justamente sobre el nivel estático de un pozo de agua subterráneo, esta elevación del pistón hace que el agua del pozo sea absorbida dentro del cilindro, ya que el efecto de succión proporcionado por el pistón levanta y abre la válvula colocada en la base del cilindro de la bomba (Figura 108). Para evitar que el agua en el interior de la tubería maestra entrase dentro del cilindro durante esta fase de funcionamiento, se utilizaba una válvula antirretorno (Figura 109).

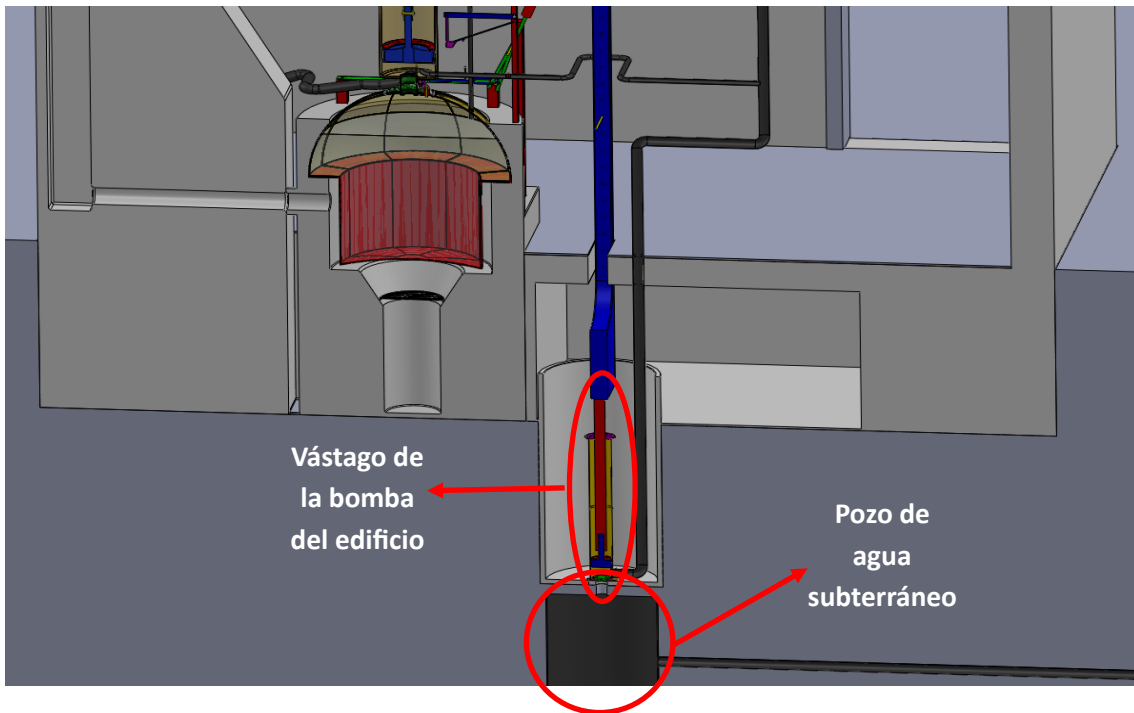


Figura 106: Vista de sección en la cual se puede observar el vástago de la bomba del interior del edificio, conectado al pistón del cilindro de la bomba.



Figura 107: Detalle de la bomba del interior del edificio y desplazamiento de su pistón, durante la fase de carga.

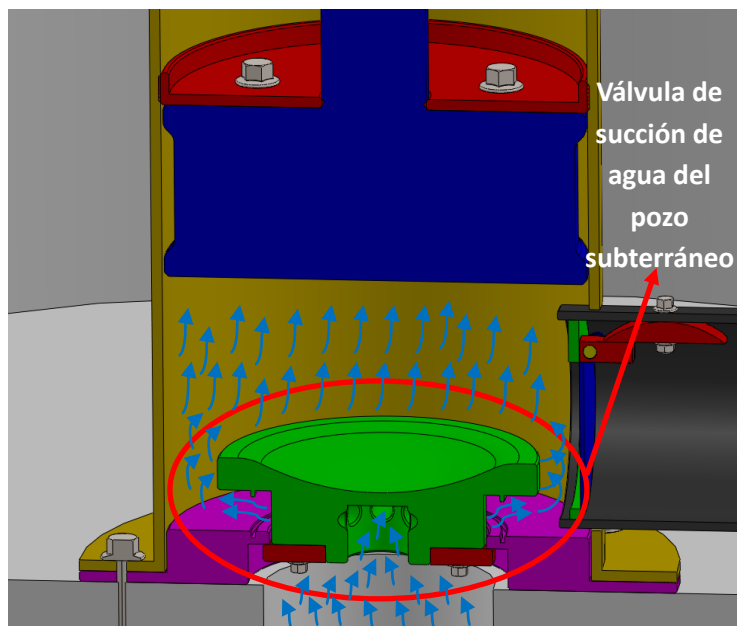


Figura 108: Detalle de la válvula de succión del agua del pozo subterráneo al cilindro de la bomba, en su posición abierta.

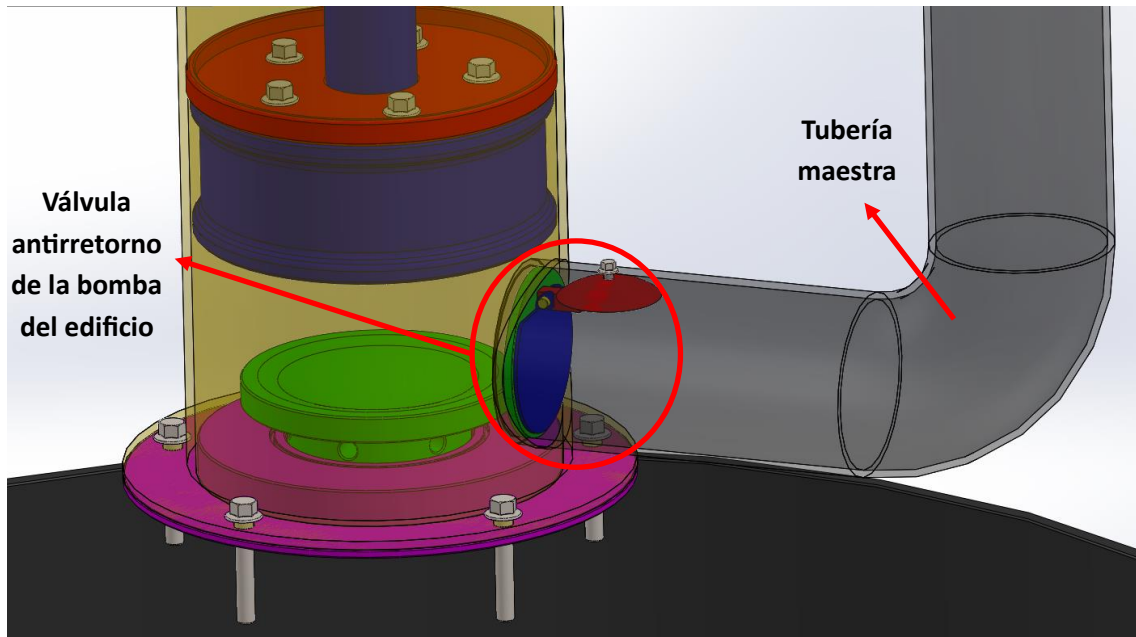


Figura 109: Válvula antirretorno de la bomba del edificio, colocada en el interior de la tubería maestra, cerrada durante la fase de carga.

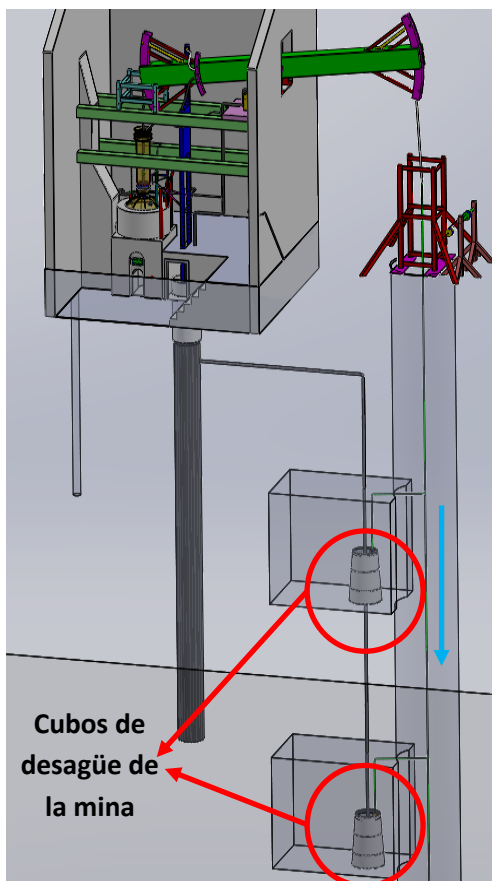


Figura 110: Cubos de desagüe y conducciones hidráulicas, colocados en el interior de la mina.

Mientras que la bomba del edificio succiona el agua del pozo que yace debajo de él, en el interior de la mina se produce otro fenómeno de bombeo.

A diferentes niveles, a lo largo de la altura de la mina, hay colocados unos cubos que están llenos del agua que hay que desaguar (Figura 110). Para que los cubos se llenen de forma automática, son colocados en aquellos puntos de la mina donde el agua se pueda canalizar. Dentro de los cubos, están colocados los cilindros de las bombas, los cuales, al comienzo de esta fase, ya están llenos de agua. Por lo tanto, al desplazarse el vástago central del sistema de bombeo del desagüe de la mina hacia abajo, debido a la rotación en sentido horario de la viga elevadora, el pistón de la bomba se desplaza igualmente hacia abajo (Figura 111), empujando así el agua en el interior del cilindro fuera de él (Figura 112).

El agua fluye a través de un sistema de tuberías ascendente que conducen hacia el nivel estático del pozo subyacente del edificio. Esto significa que la máquina de vapor se abastece a sí misma (a la bomba del edificio) del agua que necesita para su funcionamiento.

Aquí se recuerda que las bombas hidráulicas de la época de Newcomen estaban limitadas a una altura de bombeo de 10 metros, dependiendo de la fuerza que la máquina ejercía sobre el agua a desplazar. Sabiendo esto y que la mina tenía una profundidad de, aproximadamente, 46 metros, es deducible que el desagüe del agua debía hacerse de manera escalonada, es decir, colocando bombas a diferentes niveles de la mina.

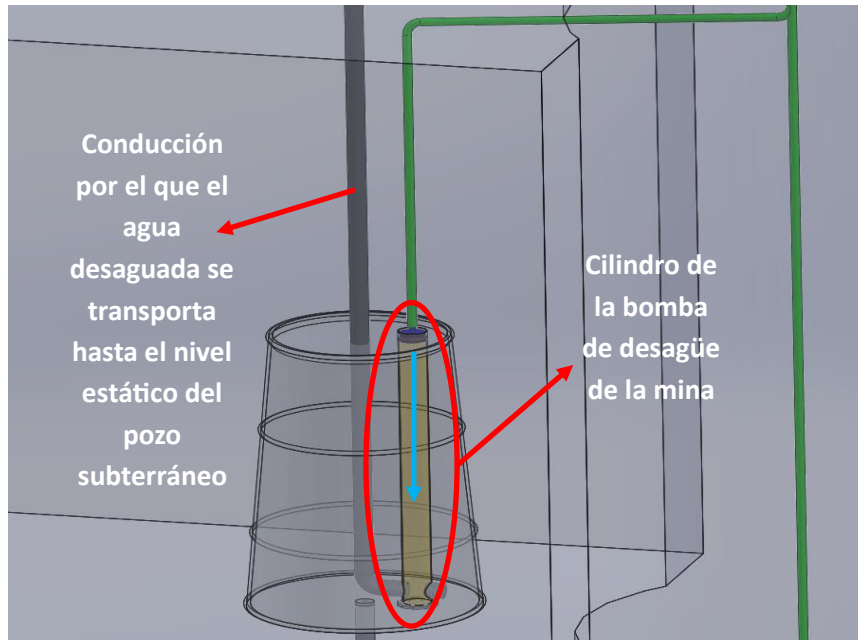


Figura 111: *Desplazamiento del pistón* a través del cilindro de la bomba de desagüe, durante la fase de carga, y tubería que conecta con el nivel estático del pozo de agua subterráneo del edificio.

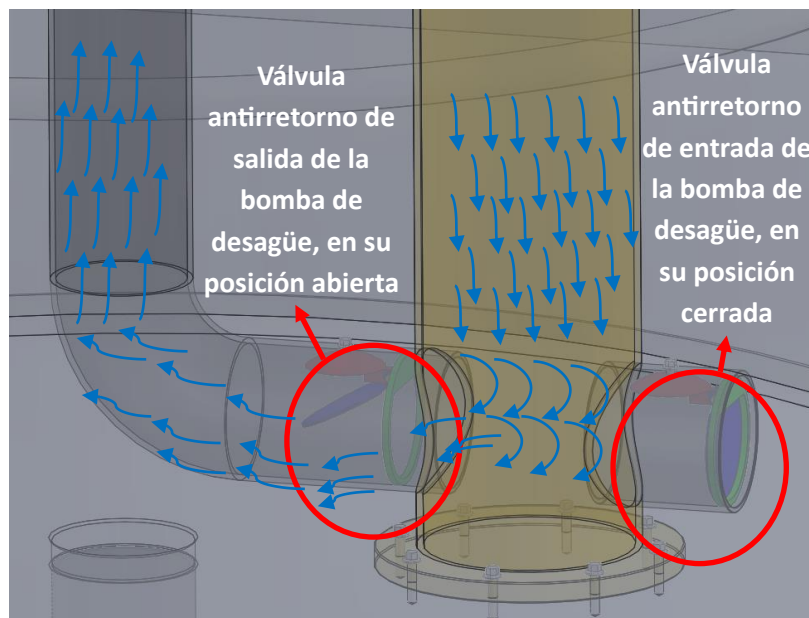


Figura 112: *Válvulas antirretorno de la bomba de desagüe para la correcta conducción del agua*, durante la fase de carga.

Para entender en detalle el funcionamiento de la máquina de Newcomen, durante su fase de carga, es imprescindible estudiar el mecanismo de apertura y cierre de la válvula de vapor, ya que esta gobierna, de manera autónoma, el recorrido de ascenso del pistón. Debido a su importancia, se le dedica el siguiente subapartado.

7.2.1.1. Gobierno de la fase de carga de la máquina mediante el cierre de la válvula de vapor.

Primero se va a explicar la válvula de vapor, ya que esta es la primera en ejercer su influencia sobre el funcionamiento de la máquina durante su fase de carga. La válvula de vapor es aquella que permite la entrada del vapor generado en la caldera hacia el interior del cilindro principal.

Al comienzo de la fase de carga, la compuerta de dicha válvula se encuentra completamente abierta, permitiendo así el pleno flujo del vapor de la caldera al cilindro (Figura 103). A medida que la viga de elevación rota en sentido horario, tanto el pistón principal como el vástago de la bomba del edificio se elevan (Figura 113). Éste último elemento tiene unas perforaciones para insertar un pasador en una de ellas, el cual está en contacto con la palanca en 'V', al comienzo de la carrera ascendente del pistón (es decir, de la fase de carga).

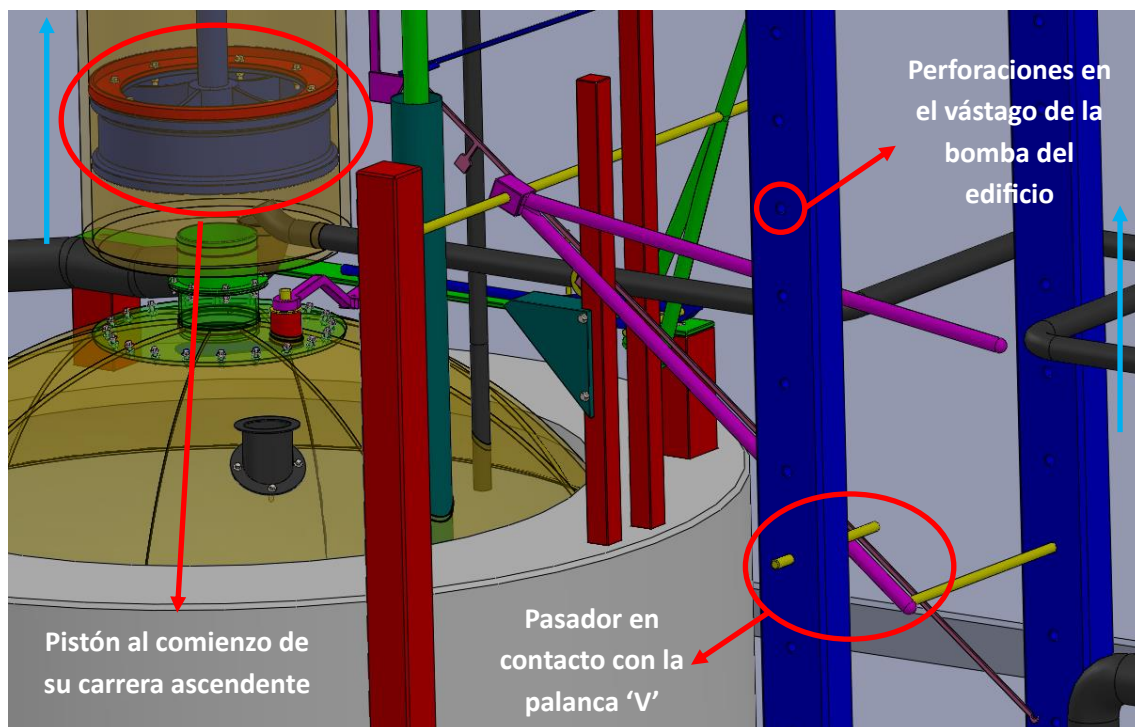


Figura 113: Pasador (en amarillo) del vástago de la bomba (en azul), en contacto con la palanca en 'V' (en morado), al inicio de la carrera ascendente del pistón.

Al comenzar el pistón su carrera ascendente, el pasador y la palanca 'V' dejan de estar en contacto, ya que el primero asciende junto con el vástago de la bomba mientras que el segundo permanece en su posición inicial. Posteriormente, al completar el pistón una cierta porción de su carrera, el pasador del vástago de la bomba vuelve a entrar en contacto con la palanca 'V' (Figura 114).

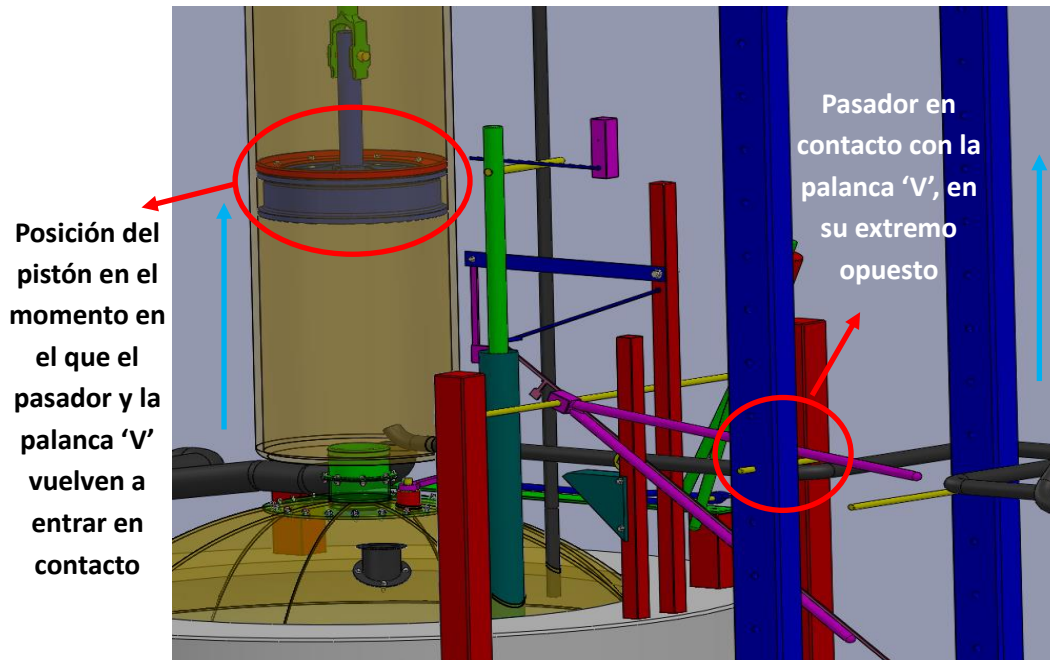


Figura 114: Pasador de nuevo en contacto con la palanca en 'V', una vez transcurrido una cierta porción de la carrera ascendente del pistón.

Una vez estos dos elementos entran en contacto, la viga elevadora continúa girando en sentido horario y, por ende, el vástago de la bomba ascendiendo. Esto significa que el pasador empuja la palanca 'V', haciéndola rotar en sentido antihorario sobre su eje de giro. Luego, al estar fija esta palanca 'V' al eje sobre el que se sostiene, éste gira en la misma proporción (Figura 115). Al otro extremo del eje de giro, se encuentra una palanca en 'Y' que está también fija al eje y que, por lo tanto, rota con él.

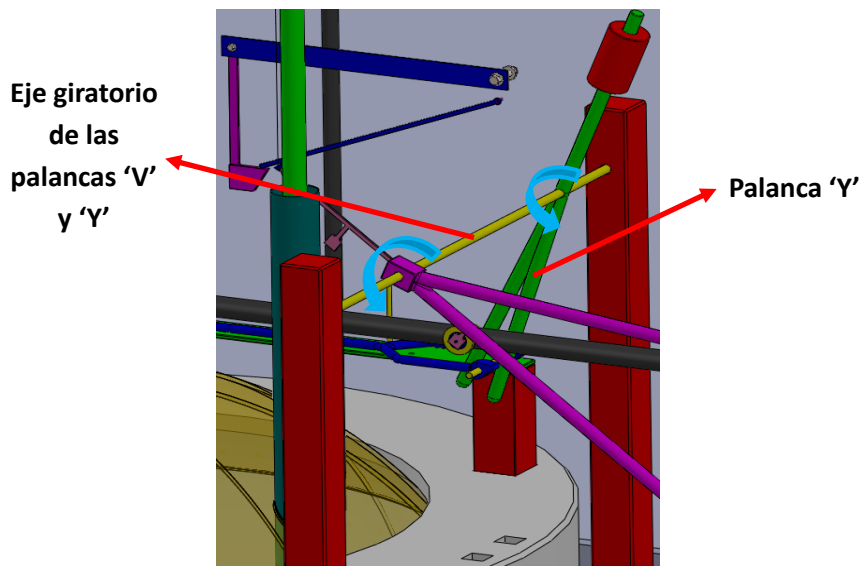


Figura 115: Rotación de las palancas 'V' (en morado) y 'Y' (en verde), sobre su eje (en amarillo), provocada por el ascenso del vástago de la bomba del edificio, durante la fase de carga.

Al rotar la palanca en 'Y', esta entra en contacto con el pasador del eslabón horizontal. Como el vástago de la bomba del edificio continúa ascendiendo, esta palanca sigue rotando y empuja al eslabón horizontal, haciéndolo avanzar (Figura 116). Al extremo contrario de éste, está fijada la

llave de la válvula de vapor, por lo que el desplazamiento horizontal del eslabón la hace girar sobre su husillo. La compuerta de la válvula de vapor, al compartir el mismo husillo que la llave, gira con ella en la misma proporción, finalizando así el mecanismo de transmisión de movimiento de la válvula de vapor.

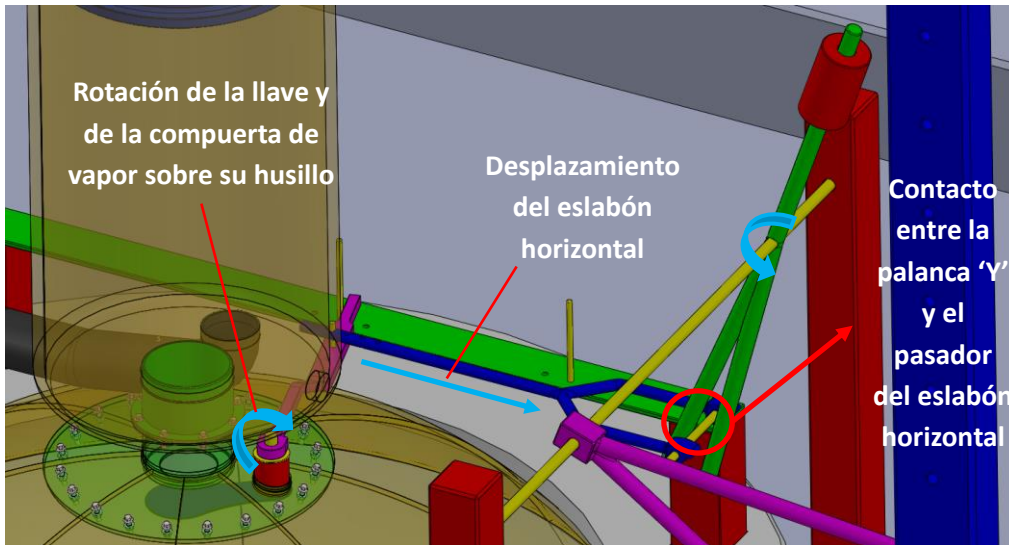


Figura 116: Cadena de *movimientos* del mecanismo de la válvula de vapor, causados por la rotación de la viga elevadora, durante la fase de carga. Elementos: Eslabón horizontal (en azul), Pasador del eslabón horizontal (en amarillo), Llave de la válvula de vapor (en morado) y husillo de la llave y de la compuerta de vapor (en amarillo).

Continuando con la fase de carga de la máquina, tanto el pistón principal como el vástago de la bomba del edificio siguen ascendiendo en sus recorridos, el eslabón horizontal avanza y tanto la llave como la compuerta de la válvula de vapor rotan, ocupando todos estos elementos las posiciones que se observan en la Figura 117.

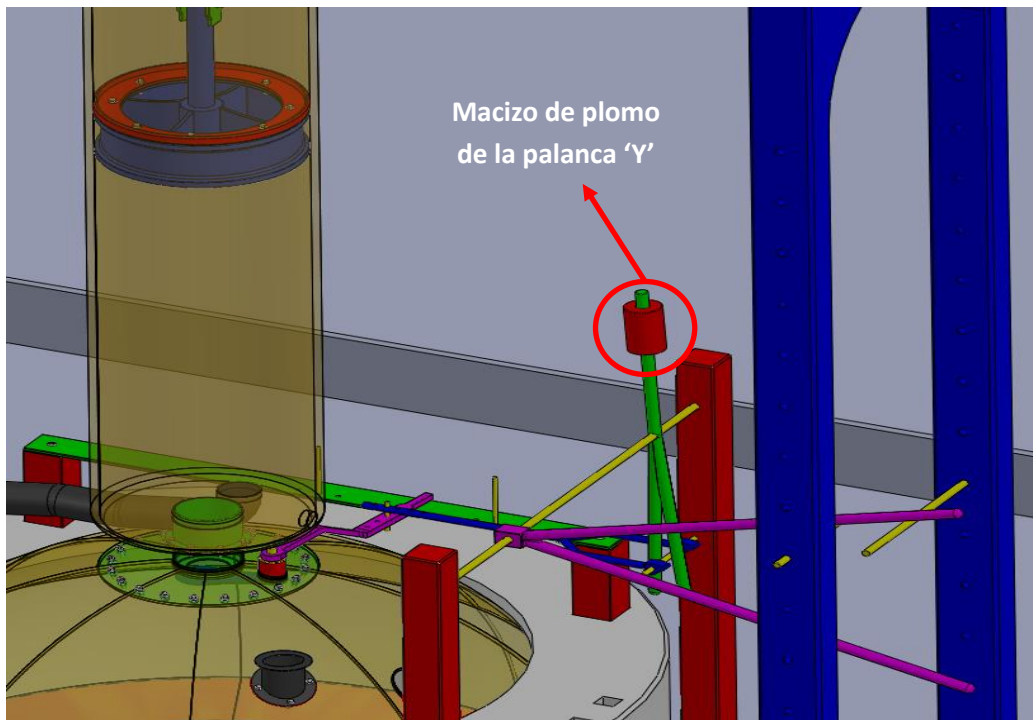


Figura 117: Posición que ocupa el pistón y los elementos de la válvula de vapor de la máquina, en el momento en el que entra en acción el macizo de plomo de la palanca 'Y' (en rojo).

Con la palanca 'Y' en esta posición, el peso desequilibrante del macizo de plomo, colocado en el extremo superior de dicha palanca, causa un aceleramiento de su rotación, la cual termina en el momento en el que la llave de la válvula de vapor choca con su tope de final de carrera de la fase de carga (Figura 120). Nótese aquí que esta ilustración ofrece una buena oportunidad para comparar el diseño realizado de la válvula de vapor con la observable en el libro de LTC Rolt y JS Allen, en la Figura 22. Esta rotación acelerada hace que la válvula de vapor termine de cerrarse cuando el pistón ocupa la posición que se observa en las Figura 118 y 119.

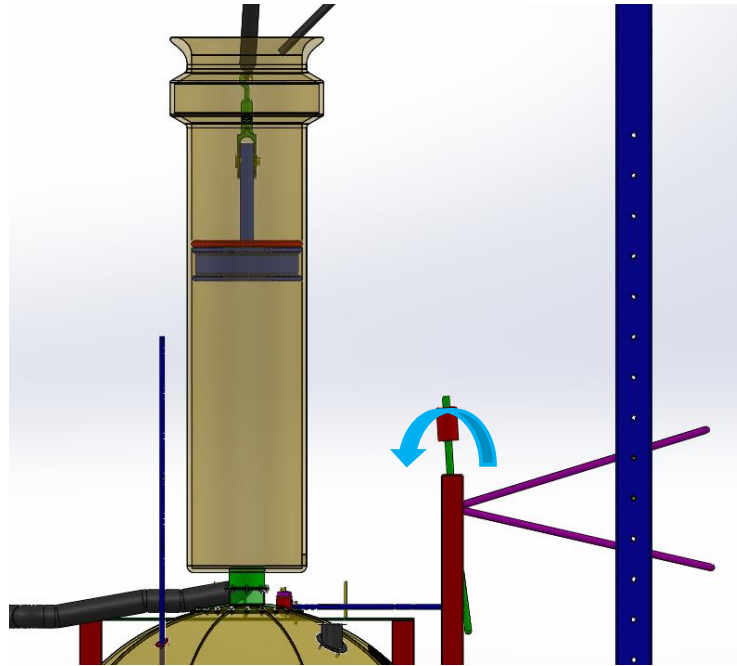


Figura 118: Rotación acelerada de la palanca 'Y', causada por el desequilibrio proporcionado por el peso del macizo de plomo.

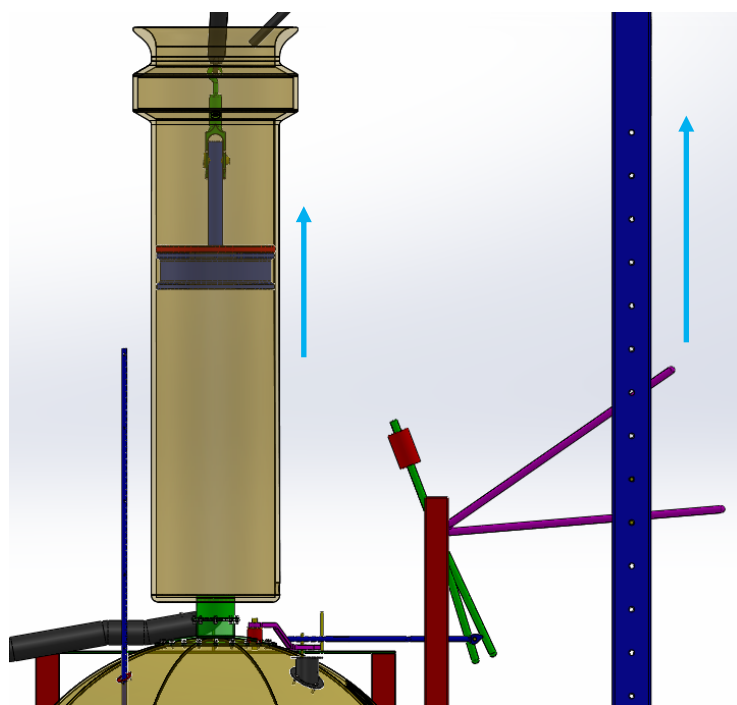


Figura 119: Posición de las palancas 'Y' y 'V' y del pistón principal y ascensos del pistón y del vástago de la bomba del edificio, una vez terminan de rotar y la válvula de vapor está completamente cerrada.

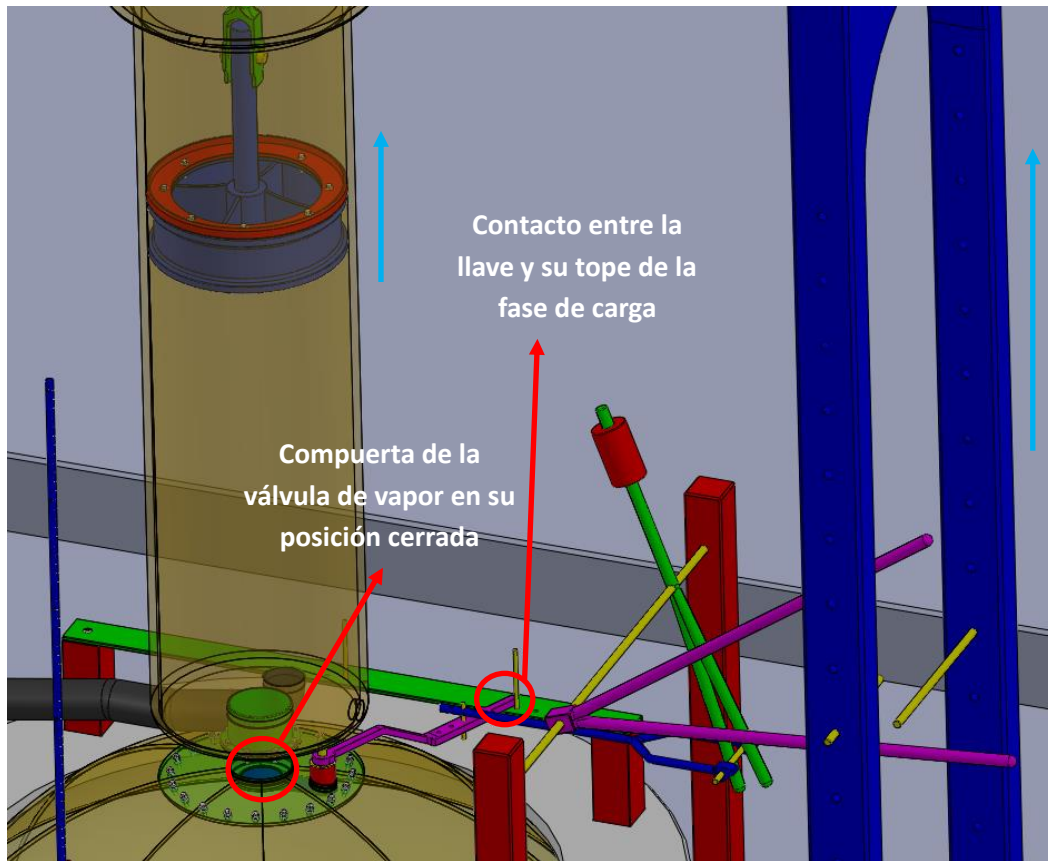


Figura 120: Posición de los distintos elementos de la válvula de vapor y del pistón en el momento en el que esta se ha cerrado por completo.

Para el correcto funcionamiento de la máquina de vapor de Newcomen, era primordial que la válvula de vapor se terminase de cerrar por completo cuando el pistón ocupaba esta posición, aproximadamente, para dejar que el vapor debajo suya perdiera presión a medida que terminaba el recorrido de ascenso, haciendo así que la fuerza resultante entre la presión atmosférica y la del vapor aumentase (dirección hacia abajo). Esto significaba que el balance de las fuerzas que actuaban sobre la viga principal provocaba una disminución del momento resultante sobre el eje de giro de la misma, llegando a su eliminación (Figura 121), disminuyendo así la aceleración de la rotación de la viga elevadora y del avance del pistón a medida que éste se aproximaba a su final de carrera.

Ello era necesario para que la viga elevadora y los demás elementos que colgaban de ella no experimentasen grandes impactos que pudiesen llegar a ser destructivos, cuando entraban en contacto con sus topes de final de carrera. Aun así, el libro de *LTC Rolt y JS Allen* [14] recoge que, a pesar de los esfuerzos de Newcomen, su máquina estaba expuesta a grandes impactos entre la viga elevadora y sus topes de final de rotación, lo cual es entendible ya que, cuando construyó su primera máquina de vapor, los conocimientos termodinámicos del vapor eran muy escasos.

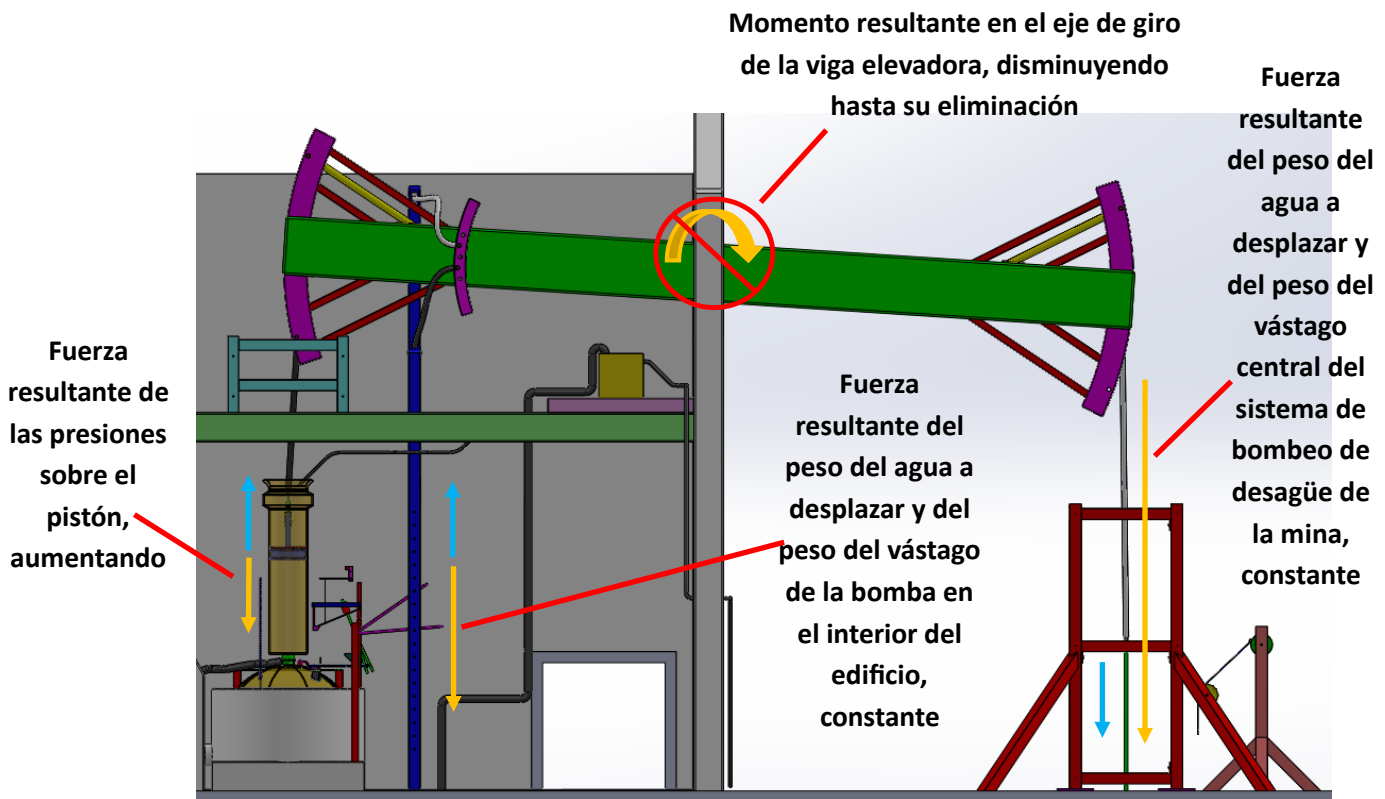


Figura 121: Fuerzas ejercidas sobre la viga elevadora por parte de los elementos que cuelgan de ella (en naranja), momento resultante sobre el eje de giro de la viga elevadora (en naranja) y desplazamientos de estos elementos (en celeste), desde el momento en el que se cierra la válvula de vapor por completo hasta que el pistón llega a su final de carrera de la fase de carga.

Una vez el pistón principal y la viga elevadora llegan a sus finales de carrera (Figura 122), las bombas de las minas han desaguado todo el agua que son capaces de desplazar en una carrera de sus pistones (Figura 111 y 112), la bomba del edificio ha absorbido el agua del pozo subyacente a ella (Figura 106 a 108) y la máquina queda estática en la posición que se observa en las Figura 122 y 123, concluyendo así su fase de carga.

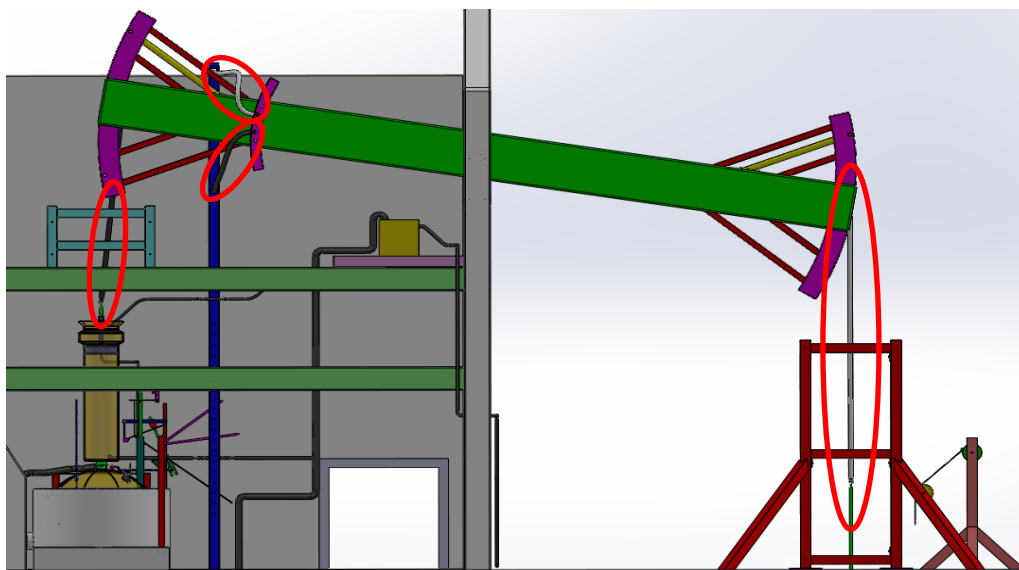


Figura 122: Vista frontal de la máquina de Newcomen en el momento en el que termina su fase de carga. Cadenas de eslabones sustituidas por conexiones simplificadas, para el estudio de funcionalidad, rodeadas en rojo.

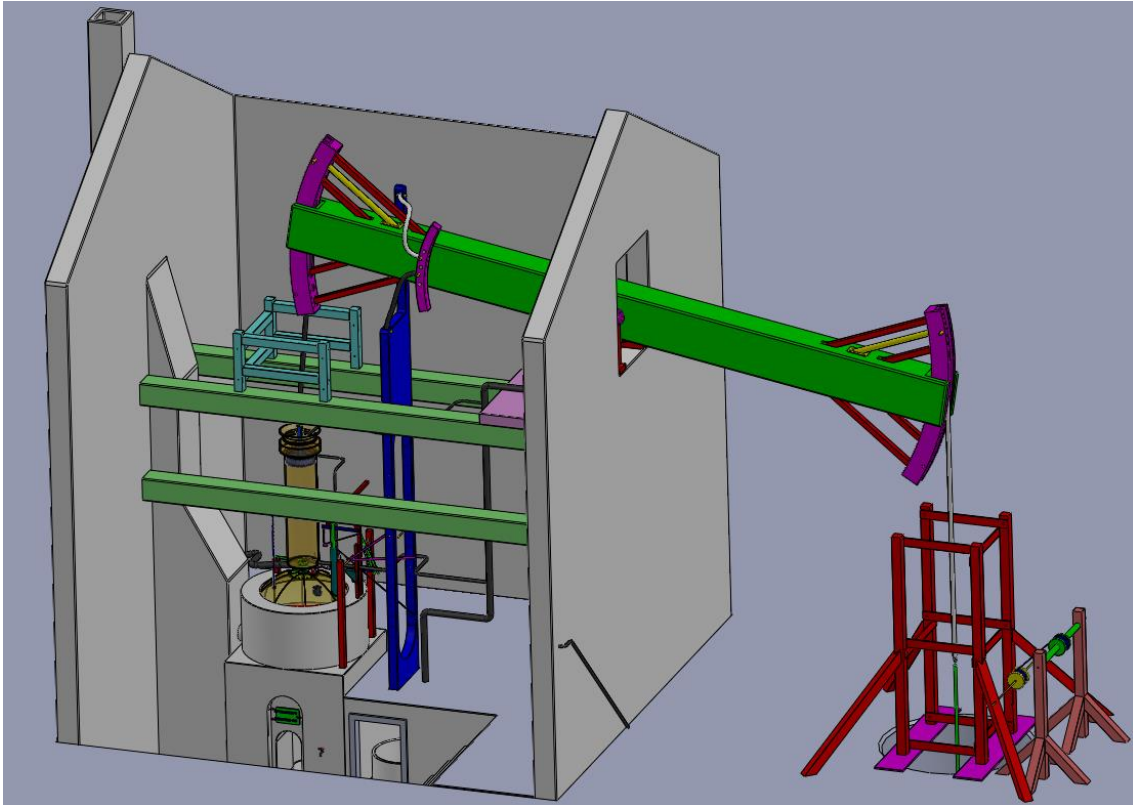


Figura 123: Vista isométrica de la máquina de Newcomen en el momento en el que termina su fase de carga.

7.2.2. Fase de Potencia.

Puesto que el primer componente de la máquina de Newcomen que ejerce su influencia sobre el funcionamiento de la misma, durante su fase de potencia, es la válvula de inyección de agua al cilindro, se procede primero a describir el funcionamiento del mecanismo de apertura y cierre de esta.

7.2.2.1. Gobierno del inicio de la fase de potencia de la máquina mediante la apertura de la válvula de inyección.

Al comienzo de la fase de descenso de la máquina de Newcomen, esta permanece en la posición que se observa en las Figura 124 a 127, durante algunos segundos. Durante este tiempo, la caldera continúa generando vapor, el cual aumenta la presión dentro de ella, ya que la válvula de vapor permanece cerrada.

Éste incremento de presión eleva ligeramente una boya, que se encuentra dentro de un cilindro (Figura 126). Dado que la capacidad de generación de vapor de esta máquina es bastante limitada (aproximadamente de 65 kPa), la boya debe estar hecha de algún material ligero (madera de balsa, por ejemplo) para que la presión del vapor pueda desplazarla verticalmente.

El ascenso de la boya presiona sobre una palanca, haciéndola girar en sentido horario. Esta palanca tiene atada una cuerda que, a su vez, está atada por su otro extremo a un retenedor. Por lo tanto, mediante esta cuerda, la rotación de la palanca hace que el retenedor rote de igual forma.

Antes de que la boya ascienda y, por lo tanto, que el retenedor rote, éste se apoya y descansa sobre el freno del retenedor. En esta posición, el retenedor está impidiendo la consecuente rotación de la palanca 'F' (de ahí el nombre de la pieza "retenedor"). Luego, una vez la boya asciende y la cuerda del retenedor lo hace rotar, la palanca 'F' rota, en sentido antihorario, hasta que impacta contra su freno.

Finalizando el tren de transmisión de movimiento de la válvula de inyección, la rotación antihoraria de la palanca 'F' hace que se abra la llave (Figura 125) que permite el paso del agua que se inyecta debajo del pistón, dentro del cilindro principal (Figura 127 y Figura 128). Nótese aquí que la siguiente figura ofrece una buena oportunidad para comparar el diseño realizado de la válvula de inyección con la observable en el libro de LTC Rolt y JS Allen, en la Figura 23.

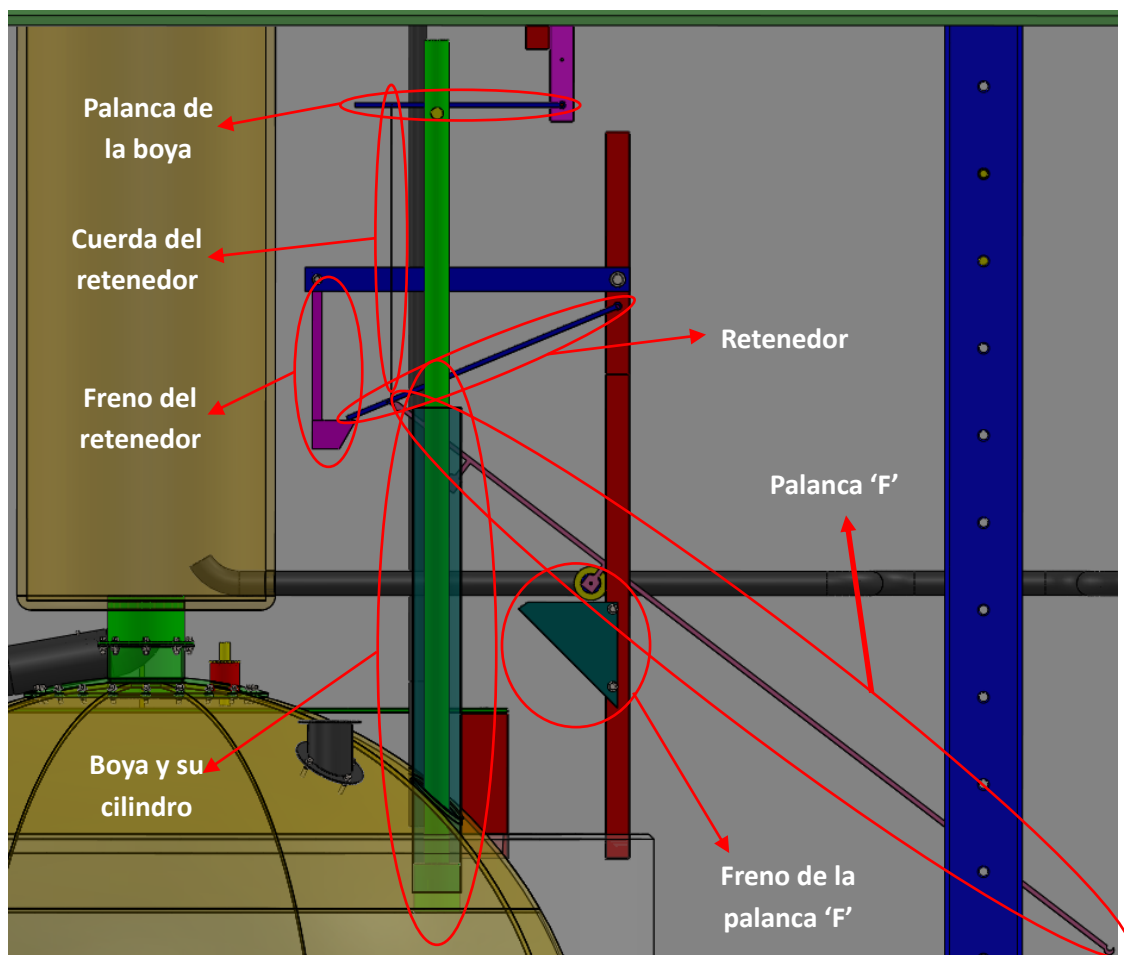


Figura 124: Elementos de la válvula de inyección de agua, en la posición cerrada.

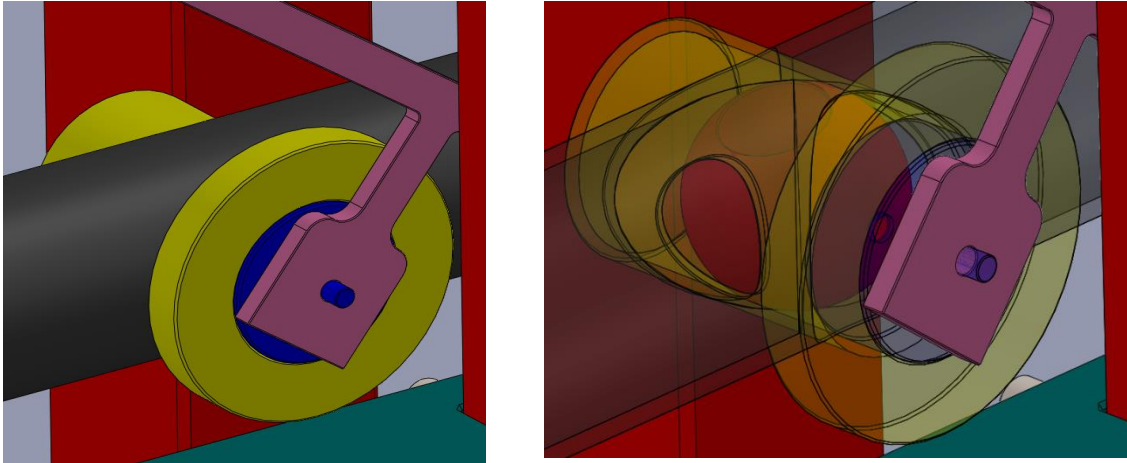


Figura 125: Exterior de la llave de la válvula de inyección (izquierda) e interior de la tubería de inyección de agua al cilindro y de la llave de la válvula de inyección, en la posición cerrada de la misma (derecha).

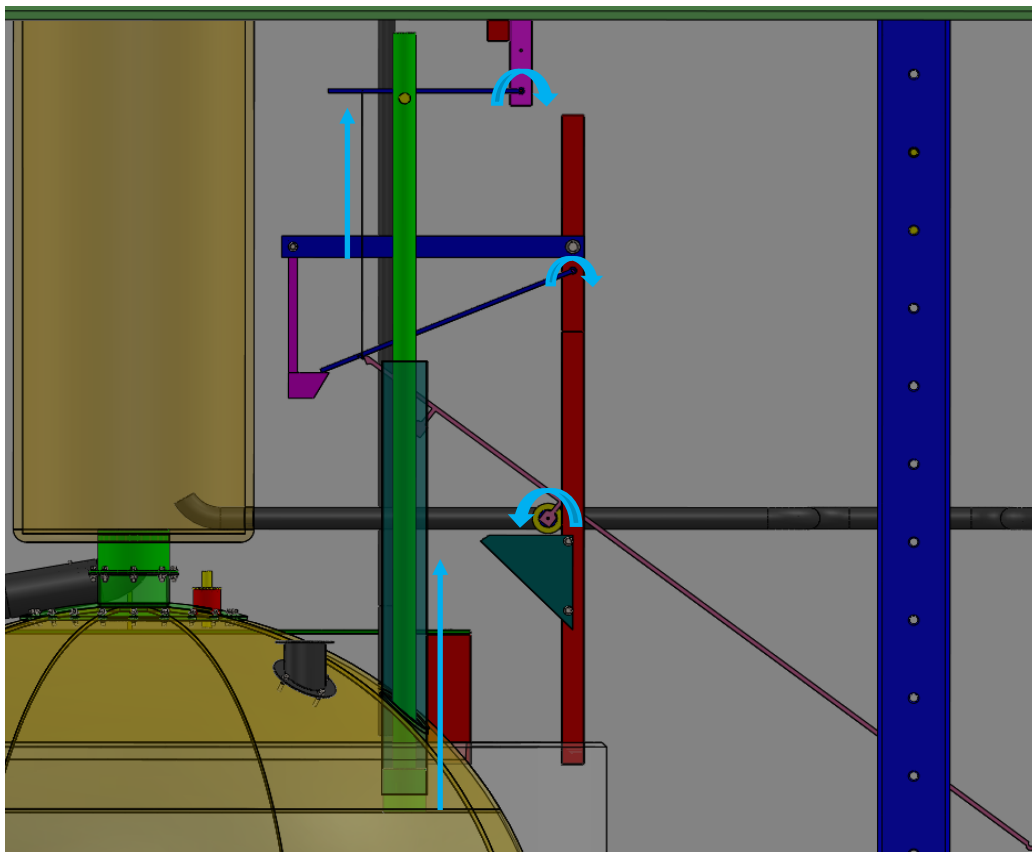


Figura 126: Transmisión de los movimientos de la válvula de inyección, durante su apertura.

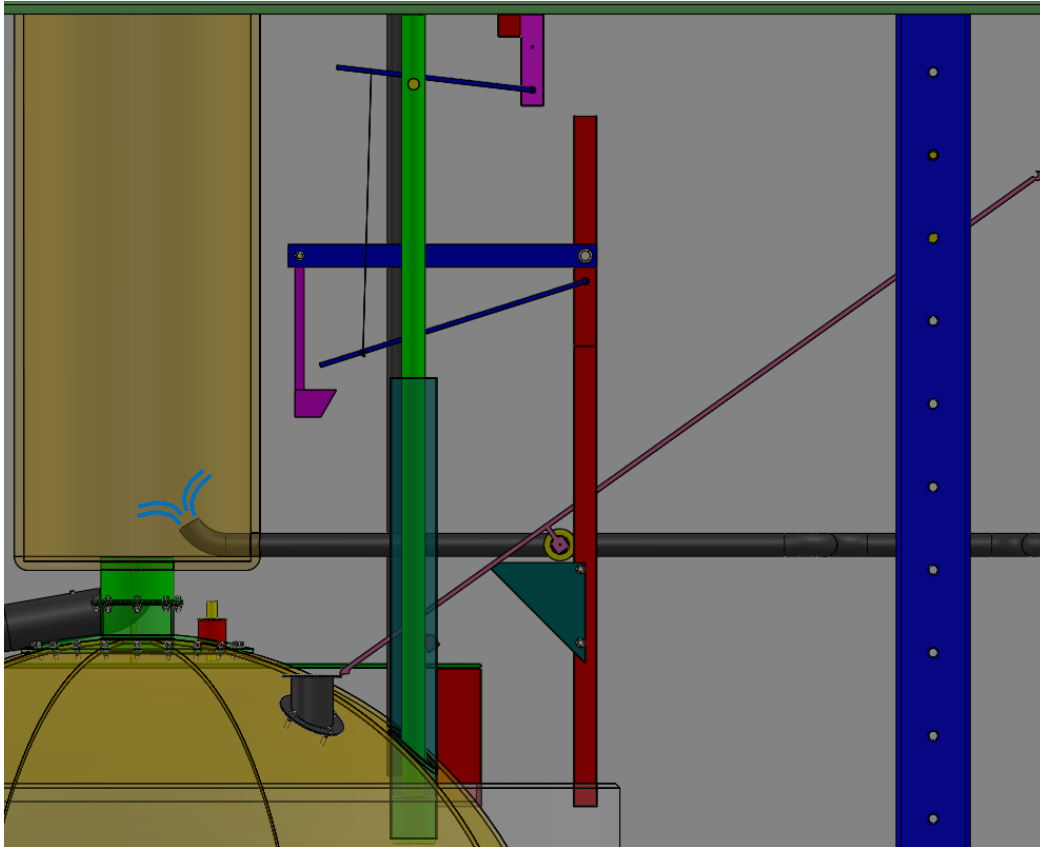


Figura 127: Elementos de la válvula de inyección de agua, en su posición abierta, y consecuente *flujo de agua al cilindro principal*.

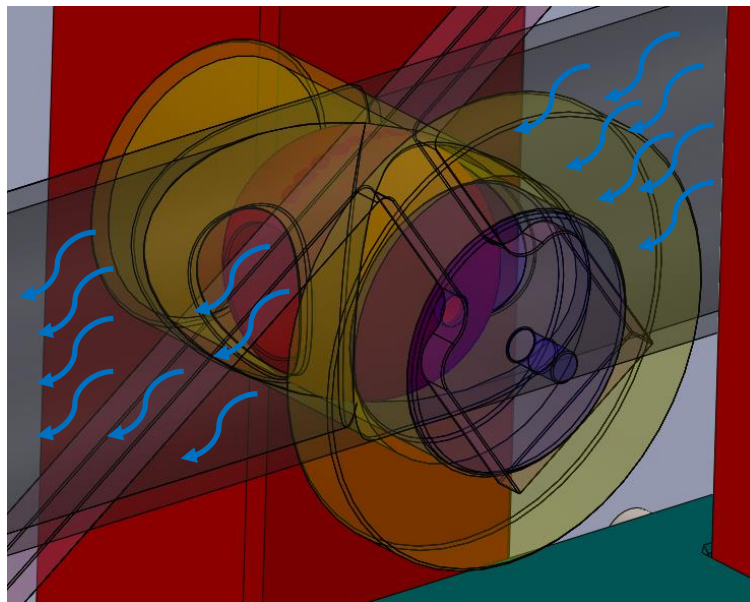


Figura 128: Interior de la tubería de inyección de agua al cilindro y de la llave de la válvula de inyección, en la posición cerrada de la misma, y *flujo del agua hacia el cilindro principal*.

7.2.2.2. Funcionamiento de la máquina de Newcomen durante el recorrido de descenso del pistón principal.

Una vez que se ha abierto la válvula de inyección, al estar la tubería maestra conectada al depósito superior y llena de agua, esta fluye a través de la llave hacia el cilindro principal, en la parte inferior al pistón (Figura 129). El agua, al estar mucho más fría que el vapor de debajo del pistón, lo enfría, lo cual reduce considerablemente la presión debajo de él, generando así un efecto de vacío debajo del pistón.

Esta reducción tan considerable en la presión debajo del pistón hace que la fuerza resultante actuando en el pistón aumente, en dirección hacia abajo (respecto al que se observa en la Figura 121), lo que significa que el pistón tira con mayor fuerza de la viga elevadora. Ello hace que el momento experimentado por la viga elevadora en su eje de giro tenga una dirección antihoraria, resultando así en los movimientos que se observan en la Figura 130.

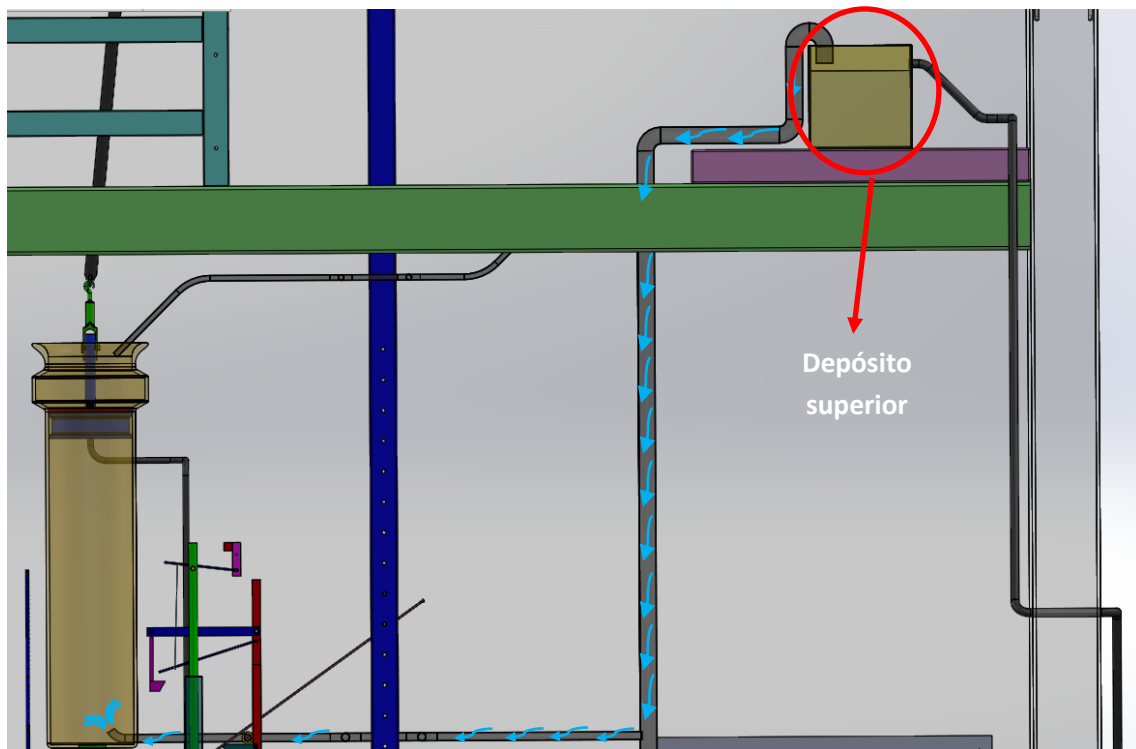


Figura 129: Flujo de agua (en celeste) después de que la válvula de inyección haya sido abierta y antes de que el pistón comience su recorrido de bajada.

Habiendo explicado ya las fuerzas que actúan sobre la viga elevadora, durante ambas fases de funcionamiento de la máquina, y que por tanto le dan movimiento, se destaca que es en esta fase en la que el vapor está dando una cierta potencia a la misma. Esto es así, porque el estado natural de la máquina es la que se observa en la Figura 122. Es decir, si no fuese por el vacío generado debajo del pistón, la máquina quedaría completamente estática en esa posición. Por lo tanto, este vacío actúa como fuerza desequilibrante que da potencia y, por lo tanto, movimiento a la máquina. Es por todo ello que a esta fase del funcionamiento de la máquina de Newcomen se le otorgase el nombre de “fase de potencia”.

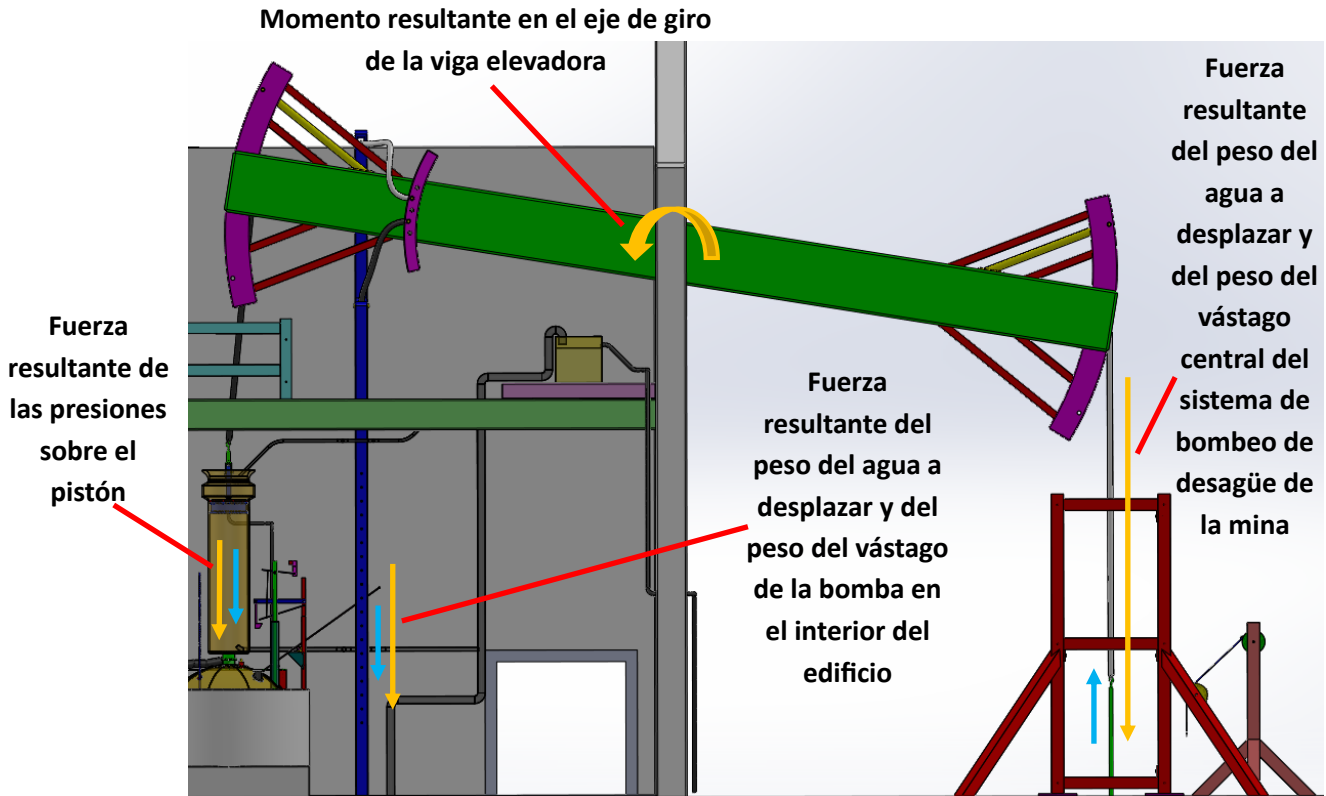


Figura 130: Fuerzas ejercidas sobre la viga elevadora (en naranja), debidas al balance de fuerzas entre el peso del volumen de agua a desplazar y los pesos de los elementos que cuelgan sobre la viga y al balance de presiones que actúan sobre el pistón principal, momento resultante sobre el eje de giro de la viga (en naranja) y desplazamientos de los elementos (en celeste), durante la fase de potencia.

Al rotar la viga elevadora en sentido antihorario, esta desplaza también al vástago de la bomba del interior del edificio (Figura 131) y, por ende, al pistón de la bomba hacia abajo (Figura 132). Luego, al estar el cilindro de la bomba lleno de agua y al cerrarse la válvula de la base del cilindro, el pistón la empuja fuera de él (Figura 133), desplazándola a través de la tubería maestra (Figura 134). En este momento, es la bomba, y no el depósito superior la que entrega el agua necesaria al cilindro. Por lo tanto, la conducción del agua dentro de la tubería pasa de descendente a ascendente, hasta llegar al depósito superior.

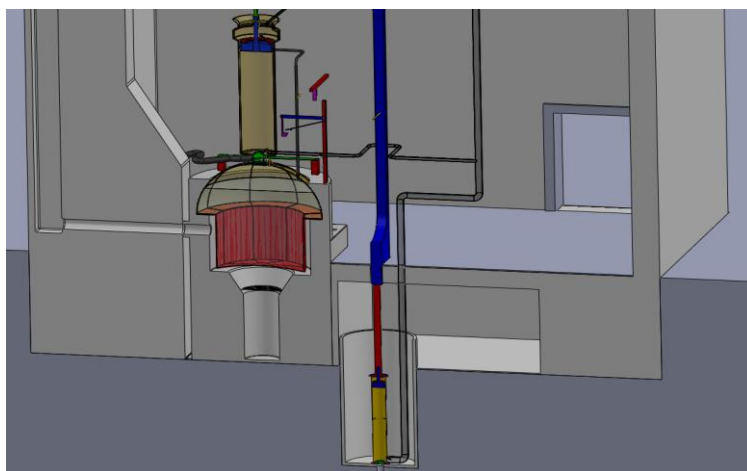


Figura 131: Vista de sección en la cual se puede observar el vástago de la bomba del interior del edificio, conectado al pistón del cilindro de la bomba, al inicio de la fase de potencia de la máquina.

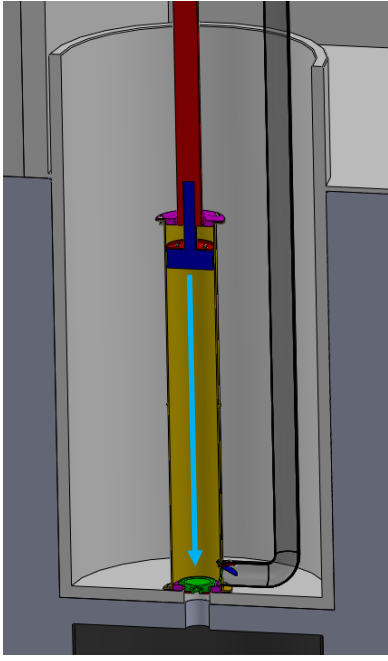


Figura 132: Detalle de la bomba del interior del edificio y desplazamiento de su pistón, durante la fase de potencia.

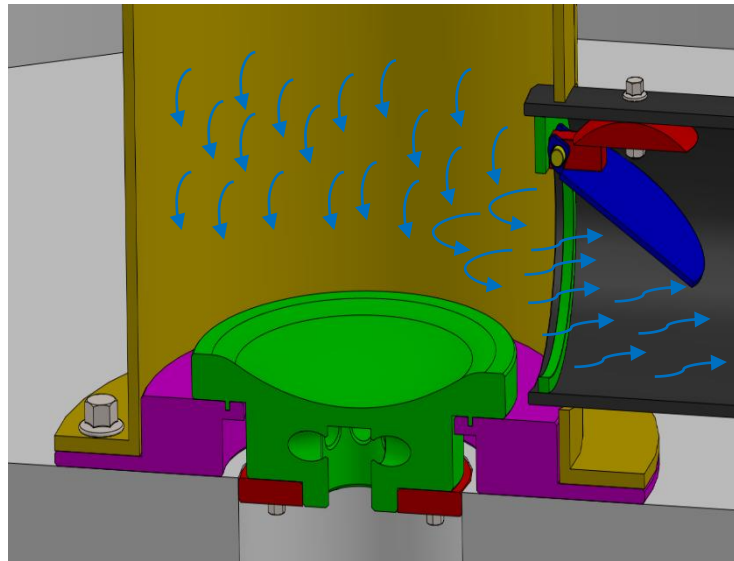


Figura 133: Detalle de la válvula de la base del cilindro (en verde) de la bomba del edificio, en su posición cerrada, y flujo del agua fuera del cilindro, a través de la válvula antirretorno (en azul).

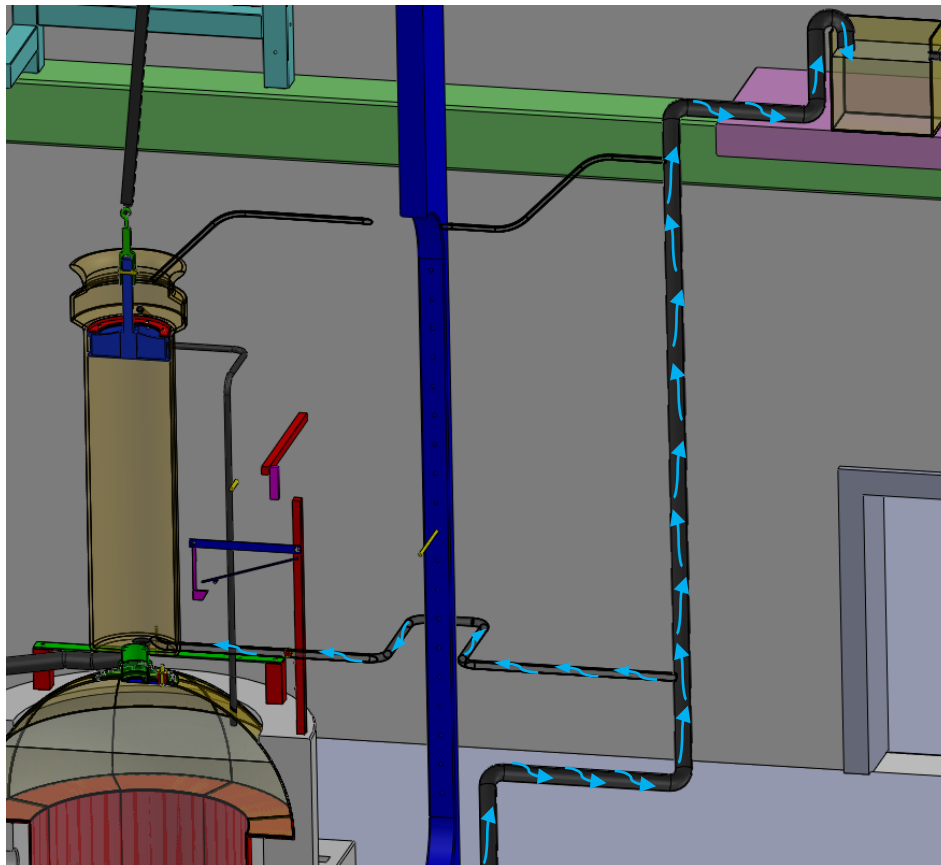


Figura 134: Flujo del agua a través de la tubería maestra y su rama que va a la parte inferior del cilindro principal, desde el momento en el que el pistón comienza su descenso hasta que se cierra la válvula de inyección.

El depósito superior (Figura 135) tiene una tubería de salida para, cuando el nivel del agua en su interior supere una cierta cota, desaguar este volumen de agua sobrante debido al bombeo de la máquina, y la conduce, finalmente, fuera del edificio.

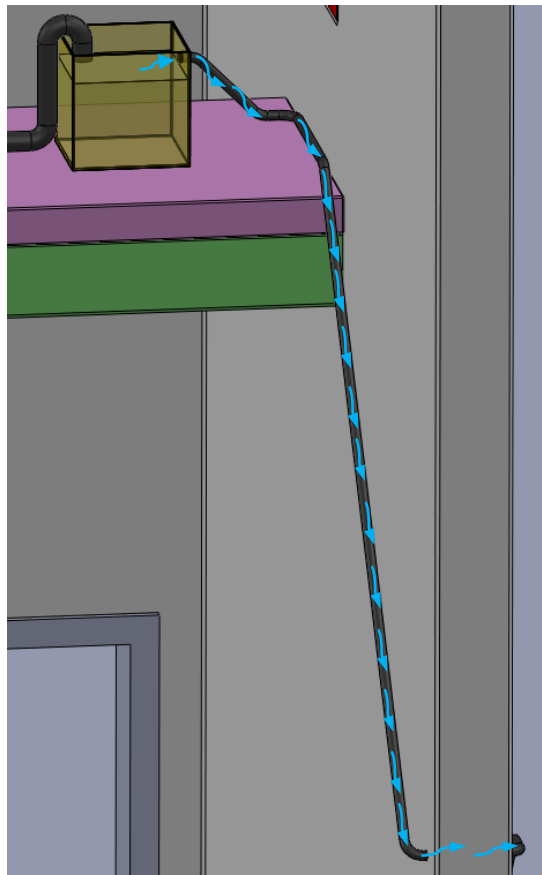


Figura 135: Flujo del agua sobrante del depósito superior hacia fuera del edificio.

Al inyectar agua en la parte inferior del cilindro principal, hace falta una tubería de desagüe que dirija el agua hacia fuera del edificio, la cual puede observarse en la Figura 136. Además, esta tubería necesita una válvula antirretorno para evitar que cualquier contenido de agua dentro de la tubería no sea absorbido en ningún momento hacia dentro del cilindro (Figura 137), debido al efecto de vacío generado durante la fase de potencia de la máquina. De hecho, debido a esto, es durante la siguiente fase de carga cuando esta agua es desaguada.

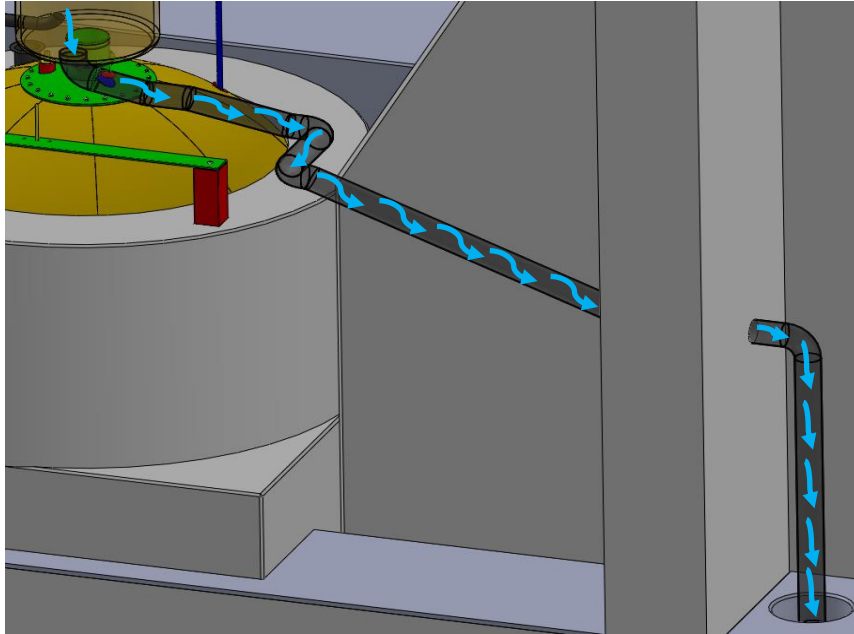


Figura 136: Flujo del agua que se desagua del inferior del cilindro principal hacia fuera del edificio.

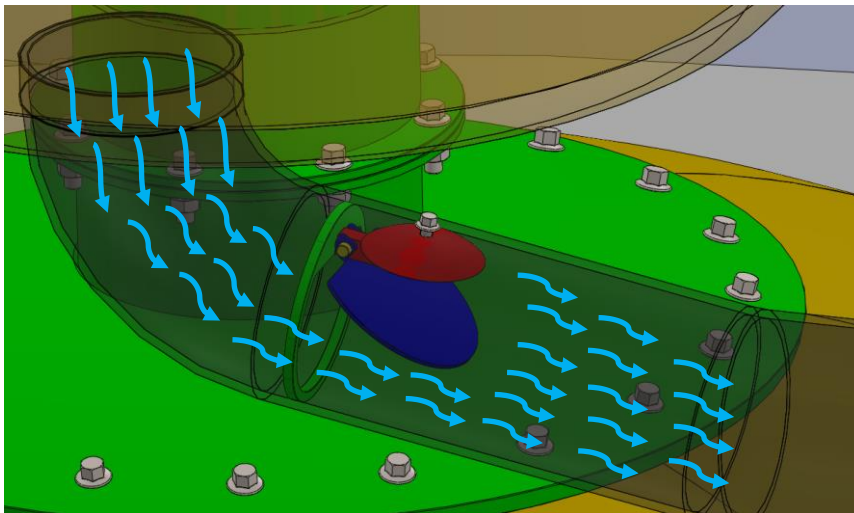


Figura 137: Válvula antirretorno de la tubería de desagüe del inferior del cilindro principal, la cual evita la succión del agua dentro de la tubería hacia el pistón.

Durante esta fase de funcionamiento de la máquina, mientras que la bomba del edificio empuja el agua de su interior al cilindro principal, las bombas de desagüe dentro de la mina experimentan el fenómeno opuesto. La viga elevadora, al rotar en sentido antihorario, eleva el vástago central del sistema de bombeo de la mina (Figura 138) y, por lo tanto, los pistones de las distintas bombas colocadas a diferentes niveles de la misma (Figura 139). Este desplazamiento succiona, en el interior de los cilindros de las bombas, el agua que se desaguará de la mina en la siguiente fase de carga. Ello se cumple debido a que la válvula antirretorno de la tubería de salida de la bomba impide el retorno del agua que ya se bombeó en la anterior fase de carga, mientras que la de la tubería de entrada a la bomba permite la succión del agua del cubo al interior del cilindro (Figura 140).

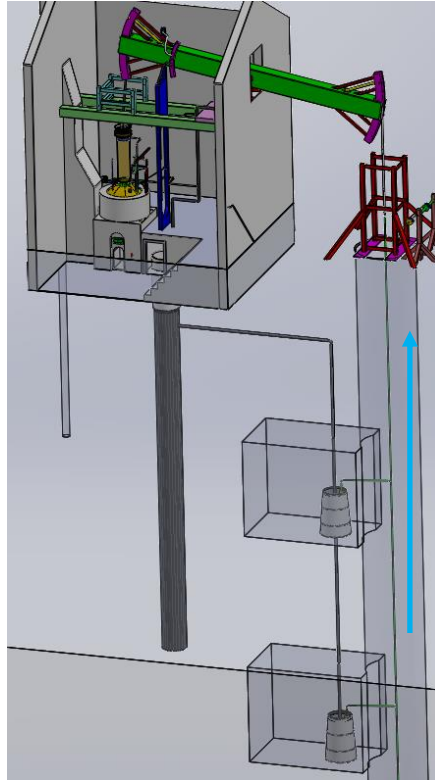


Figura 138: *Desplazamiento* ascendente del vástago central del sistema de bombeo de la mina.

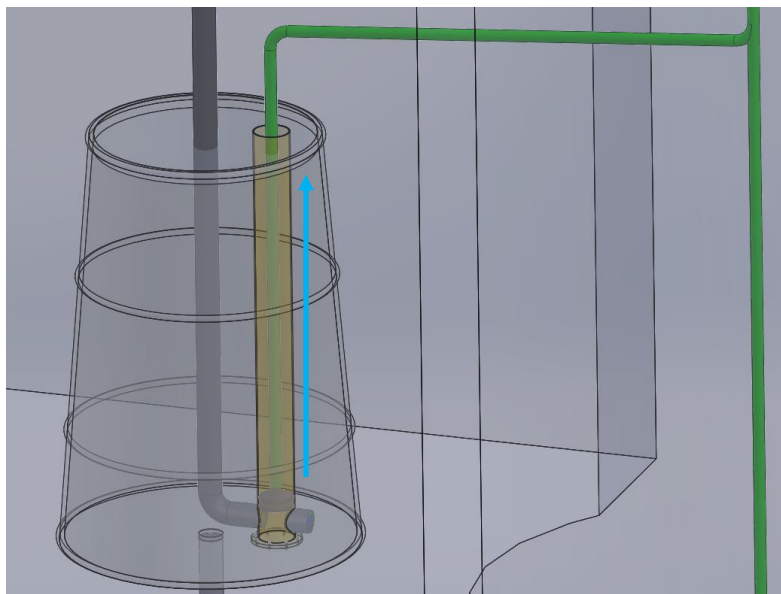


Figura 139: *Desplazamiento del pistón* a través del cilindro de la bomba de desagüe, durante la fase de potencia.

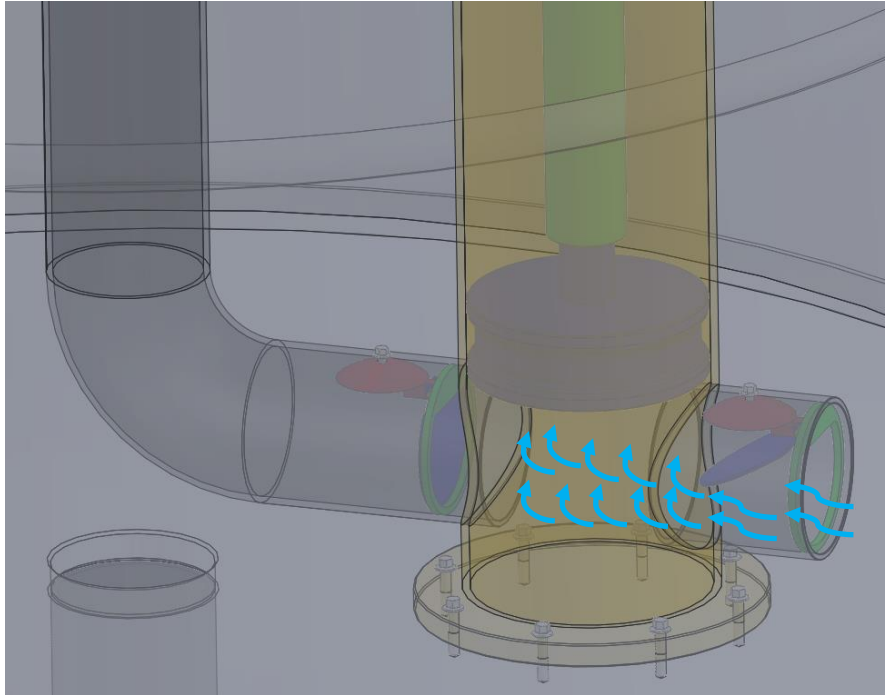


Figura 140: Válvulas antirretorno de la bomba de desagüe para la correcta *conducción del agua*, durante la fase de potencia.

Para poder continuar con la descripción del funcionamiento de la máquina de Newcomen, durante su fase de potencia, es imprescindible estudiar como los mecanismos de apertura y cierre de las válvulas de vapor y de inyección trabajan en conjunto, ya que estos gobiernan, de manera autónoma, el recorrido de descenso del pistón. Debido a su importancia, se les dedica el siguiente subapartado.

7.2.2.3. Gobierno del descenso del pistón principal, durante la fase de potencia de la máquina, mediante el cierre de la válvula de inyección y la apertura de la válvula de vapor.

Una vez el pistón comienza su recorrido de descenso a lo largo del cilindro principal (Figura 141), el vástago de la bomba del edificio también se desplaza verticalmente hacia abajo. Este elemento tiene fijado un pasador, a una de sus perforaciones, el cual empuja la palanca 'F' de la válvula de inyección. Este contacto se produce, prácticamente, en el momento exacto en el que el pistón comienza a descender. Por lo tanto, al ser la palanca 'F' la que cierra y abre la llave de paso de la válvula, ésta se cierra gradualmente a medida que el pistón principal y el vástago de la bomba del edificio descienden.

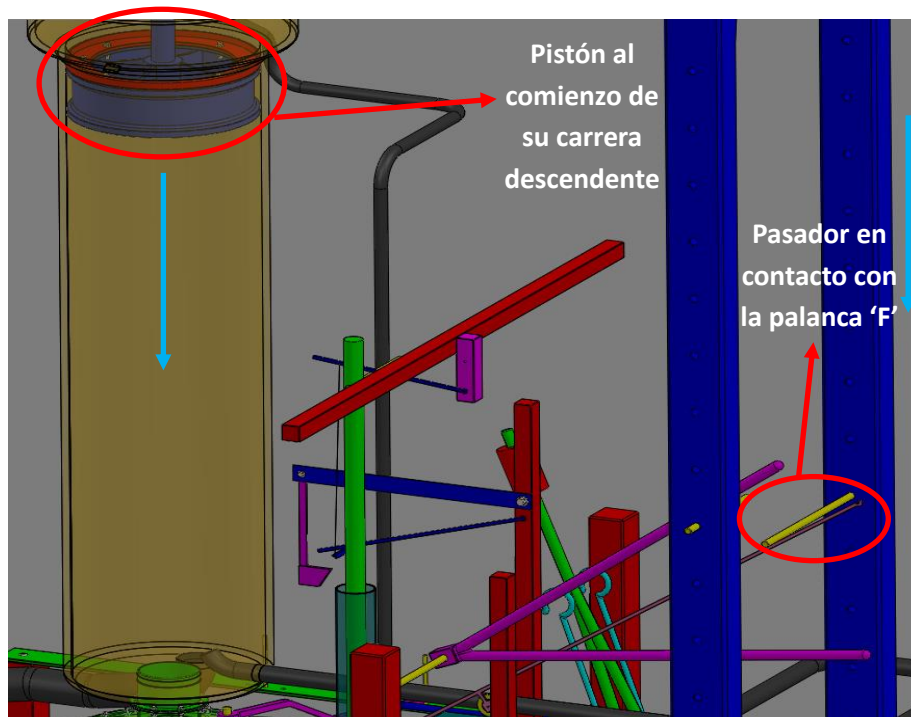


Figura 141: Pasador (en amarillo) del vástago de la bomba (en azul), en contacto con la palanca en 'F' (en rosa), al inicio de la carrera descendente del pistón. Desplazamientos del pistón y del vástago de la bomba.

Llega un momento en el descenso del pistón en el que el vástago de la bomba del edificio empuja, mediante su otro pasador, la palanca 'V' de la válvula de vapor, hacia abajo (Figura 142). A partir de este momento, la válvula de inyección sigue siendo cerrada gradualmente mientras que la válvula de vapor es abierta, también, de forma gradual.

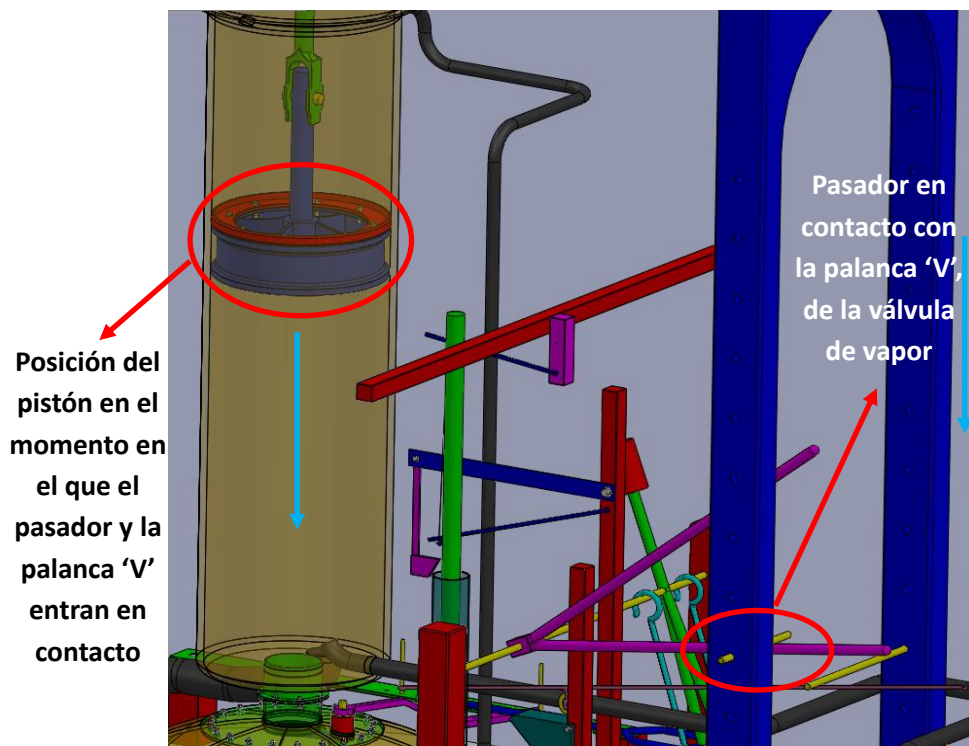


Figura 142: Pasador en contacto con la palanca en 'V' (en azul), de la válvula de vapor, una vez transcurrido una cierta porción de la carrera descendente del pistón. Desplazamientos del pistón y del vástago de la bomba.

Luego, al rotar la palanca 'V' de la válvula de vapor en sentido horario sobre su eje de rotación, y al estar esta fija a su eje, la palanca 'Y', que está también fija al mismo eje, gira de igual forma (Figura 143).

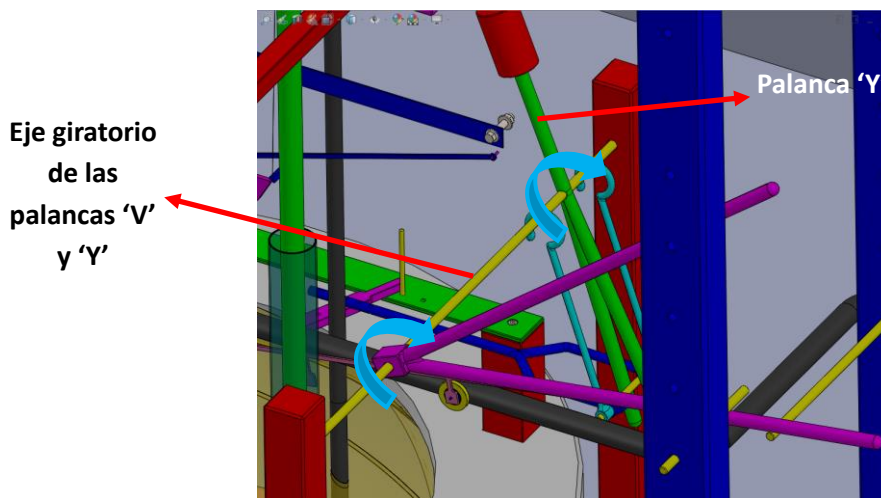


Figura 143: Rotación de las palancas 'V' (en morado) y 'Y' (en verde), sobre su eje (en amarillo), provocada por el descenso del vástago de la bomba del edificio, durante la fase de potencia.

Al rotar la palanca en 'Y', esta entra en contacto con el pasador del eslabón horizontal (Figura 144). Como el vástago de la bomba del edificio continúa descendiendo, esta palanca sigue rotando y empuja al eslabón horizontal, haciéndolo retroceder. Al extremo contrario de éste, está fijada la llave de la válvula de vapor, por lo que el desplazamiento horizontal del eslabón la hace girar sobre su husillo. La compuerta de la válvula de vapor, al compartir el mismo husillo que la llave, gira con ella en la misma proporción, finalizando así el mecanismo de transmisión de movimiento de la válvula de vapor.

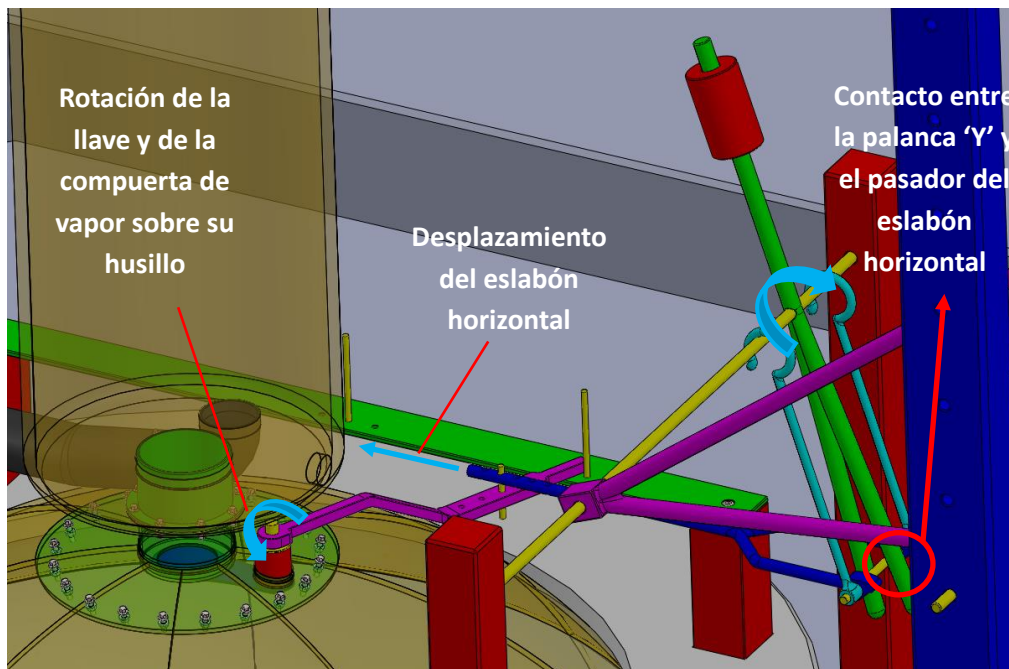


Figura 144: Cadena de movimientos del mecanismo de la válvula de vapor, causados por la rotación de la viga elevadora, durante la fase de potencia. Elementos: Eslabón horizontal (en azul), Pasador del eslabón horizontal (en amarillo), Llave de la válvula de vapor (en morado) y husillo de la llave y de la compuerta de vapor (en amarillo).

Continuando con la fase de potencia de la máquina, tanto el pistón principal como el vástago de la bomba del edificio siguen descendiendo en sus recorridos, el eslabón horizontal retrocede y tanto la llave como la compuerta de la válvula de vapor rotan, ocupando todos estos elementos las posiciones que se observan en la Figura 145.

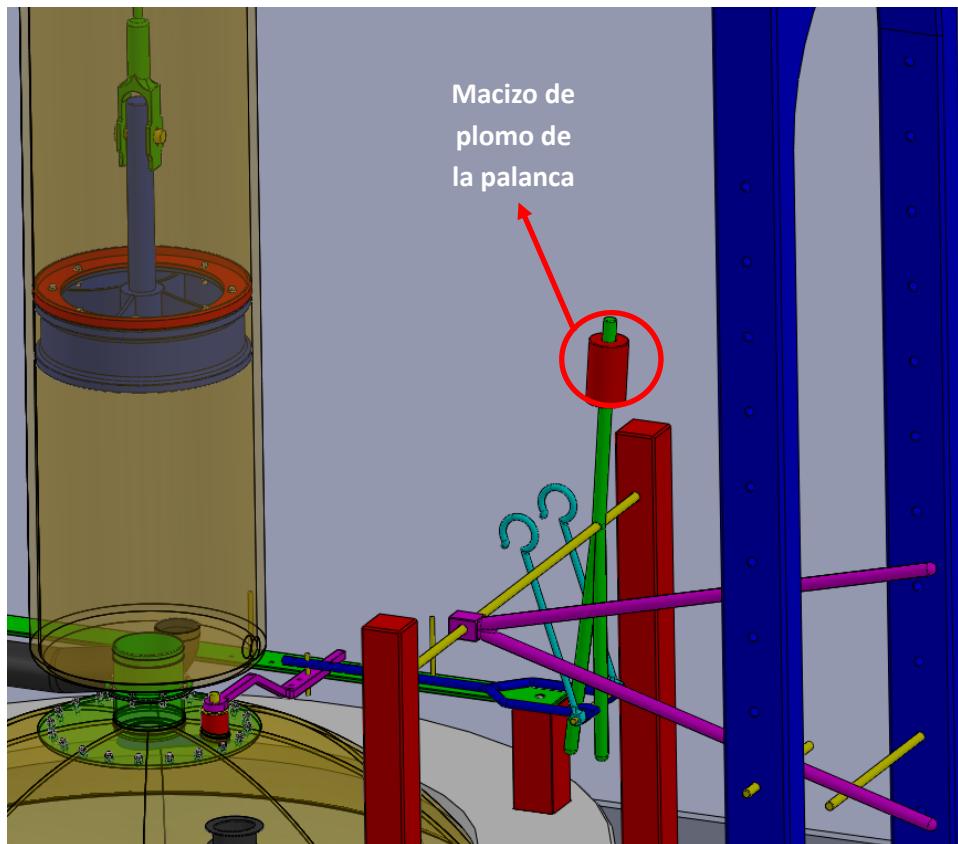


Figura 145: Posición que ocupa el pistón y los elementos de la válvula de vapor de la máquina, en el momento en el que entra en acción el macizo de plomo de la palanca 'Y' (en rojo).

Con la palanca 'Y' en esta posición, el peso desequilibrante del macizo de plomo, colocado en el extremo superior de dicha palanca, causa un aceleramiento de su rotación (Figura 146), la cual termina en el momento en el que la llave de la válvula de vapor choca con su tope de final de carrera de la fase de potencia (Figura 148). Esta rotación acelerada hace que la válvula de vapor termine de abrirse cuando el pistón ocupa la posición que se observa en las Figura 147 y 148.

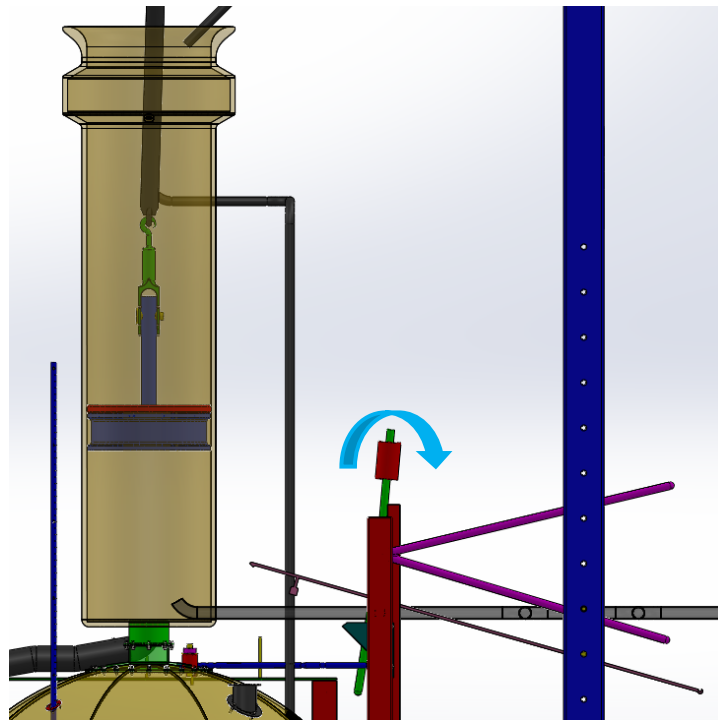


Figura 146: Rotación acelerada de la palanca 'Y', causada por el desequilibrio proporcionado por el peso del macizo de plomo.

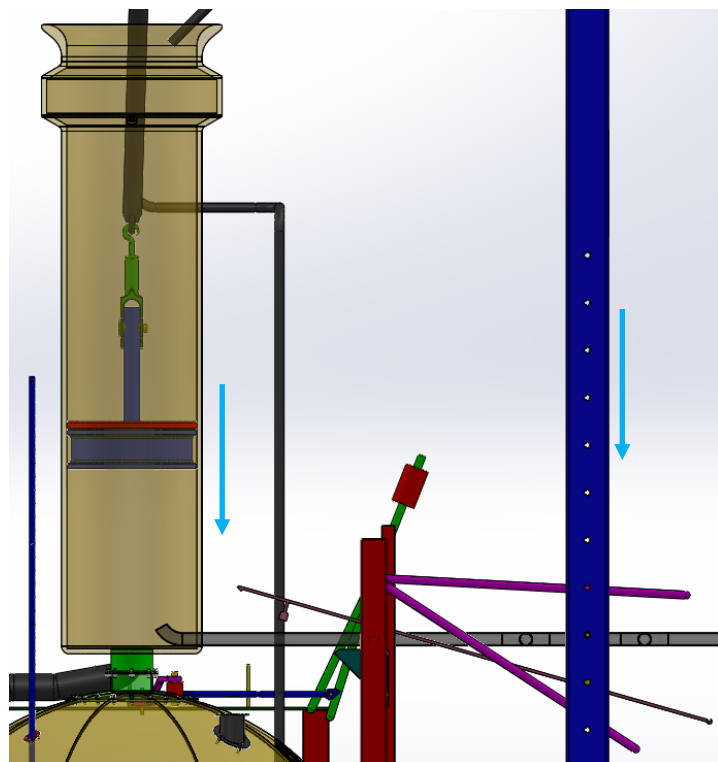


Figura 147: Posición de las palancas 'Y', 'V' y 'F' y del pistón principal y descensos del pistón y del vástago de la bomba del edificio, una vez terminan de rotar y la válvula de vapor está completamente abierta.

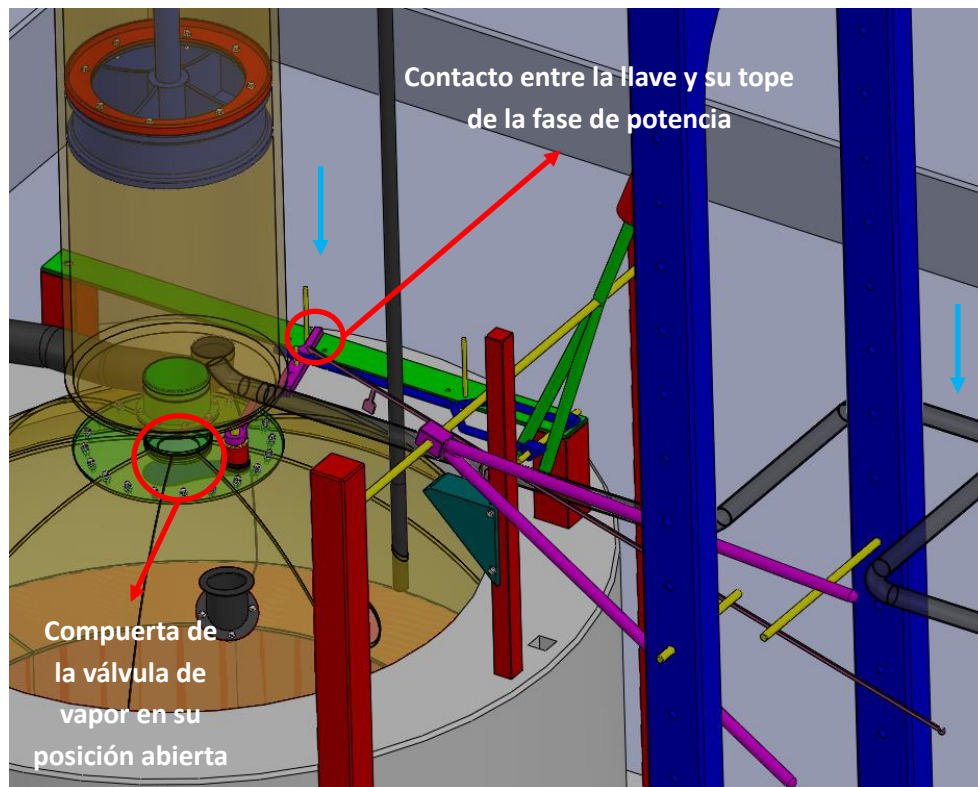


Figura 148: Posición de los distintos elementos de la válvula de vapor, de la palanca 'F' de la válvula de inyección y del pistón en el momento en el que la válvula de vapor se ha abierta por completo.

Para el correcto funcionamiento de la máquina de vapor de Newcomen, era primordial que la válvula de vapor se terminase de abrir por completo cuando el pistón ocupaba esta posición, aproximadamente, para dejar que el vapor debajo suya ganase presión a medida que terminaba el recorrido de descenso, haciendo así que la fuerza resultante entre la presión atmosférica y la del vapor disminuyese (dirección hacia abajo). Esto significaba que el balance de las fuerzas que actuaban sobre la viga principal provocaba una disminución del momento resultante sobre el eje de giro de la misma, llegando a eliminarse (Figura 149), disminuyendo así la aceleración de la rotación de la viga elevadora y del avance del pistón a medida que éste se aproximaba a su final de carrera.

Ello era necesario para que la viga elevadora y los demás elementos que colgaban de ella no experimentasen grandes impactos que pudiesen llegar a ser destructivos, cuando entraban en contacto con sus topes de final de carrera. Aun así, el libro de *LTC Rolt y JS Allen* [14] recoge que, a pesar de los esfuerzos de Newcomen, su máquina estaba expuesta a grandes impactos entre la viga elevadora y sus topes de final de rotación, lo cual es entendible ya que, cuando construyó su primera máquina de vapor, los conocimientos termodinámicos del vapor eran muy escasos.

Además de evitar estos grandes impactos, la apertura temprana de la válvula de vapor era importante para hacer que la máquina comenzase su siguiente fase de carga en el menor tiempo posible desde el momento en el que la fase de potencia terminase. Es decir, para hacer que el pistón comenzase su siguiente recorrido ascendente, prácticamente, en cuanto terminase el recorrido descendente.

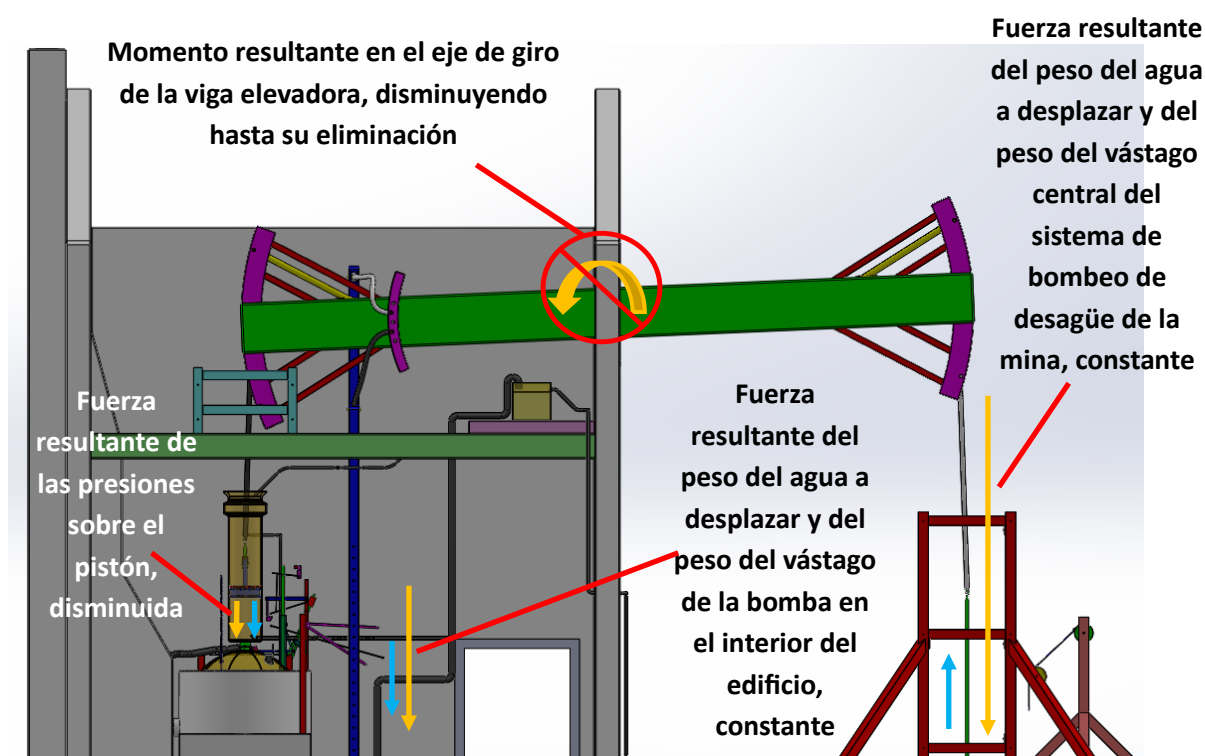


Figura 149: Fuerzas ejercidas sobre la viga elevadora por parte de los elementos que cuelgan de ella (en naranja), momento resultante sobre el eje de giro de la viga elevadora (en naranja) y desplazamientos de estos elementos (en celeste), desde el momento en el que se abre la válvula de vapor por completo hasta que el pistón llega a su final de carrera de la fase de potencia.

Cabe destacar que cuando la válvula de vapor se ha abierto por completo, la válvula de inyección no se ha terminado de cerrar (como se puede apreciar en las Figura 146 y 147), por lo que desde este momento hasta que se termina la fase de potencia, dentro del pistón está accediendo tanto el vapor de la caldera como el agua de condensación. Esto significa que la máquina de Newcomen era muy ineficiente, desde un punto de vista térmico, no solamente debido a que la condensación del vapor se realizaba en el interior del cilindro principal, sino también debido a que había momentos en los que se inyectaba, a la vez, tanto vapor como agua fría.

Una vez el pistón principal y la viga elevadora llegan a sus finales de carrera (Figura 152), la llave de la válvula de inyección está en su posición completamente cerrada. La presión dentro de la caldera ha disminuido lo suficiente como para que la boya descienda y vuelva a su posición más inferior (Figura 150 y 151), debido a que el vapor de la caldera fluye hacia el cilindro principal. Esto hace que la palanca de la boya y el retenedor, mediante el cordón que une a estas dos, desciendan de igual forma. Finalmente, la palanca 'F' de la válvula de inyección queda apoyada sobre el retenedor, lo cual significa que ésta no girará ni abrirá la válvula de inyección en la próxima fase de carga, cuando el pistón y el vástago de la bomba asciendan.

Además, las bombas de las minas han absorbido todo el agua que son capaces de desplazar en una carrera de sus pistones (Figura 139 y 140), la bomba del edificio ha expulsado todo el agua de su interior (Figura 132 a 133) y la máquina queda estática en la posición que se observa en las Figura 152 y 153, concluyendo así su fase de potencia.

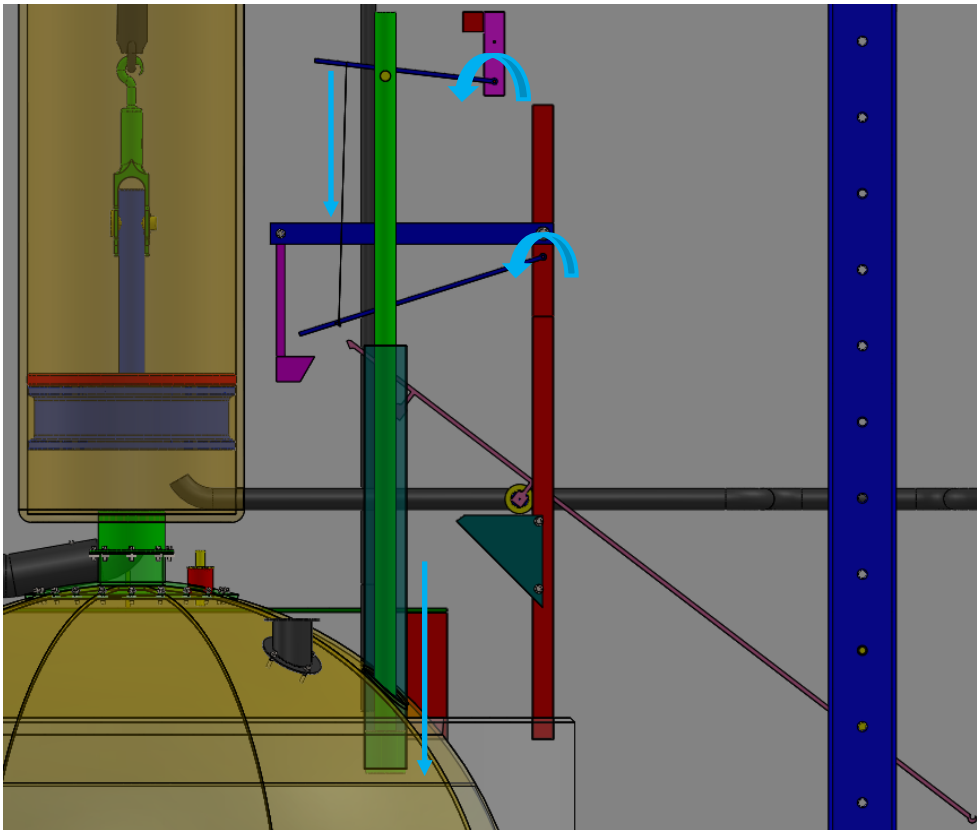


Figura 150: Transmisión de los movimientos de la válvula de inyección, durante su cierre.

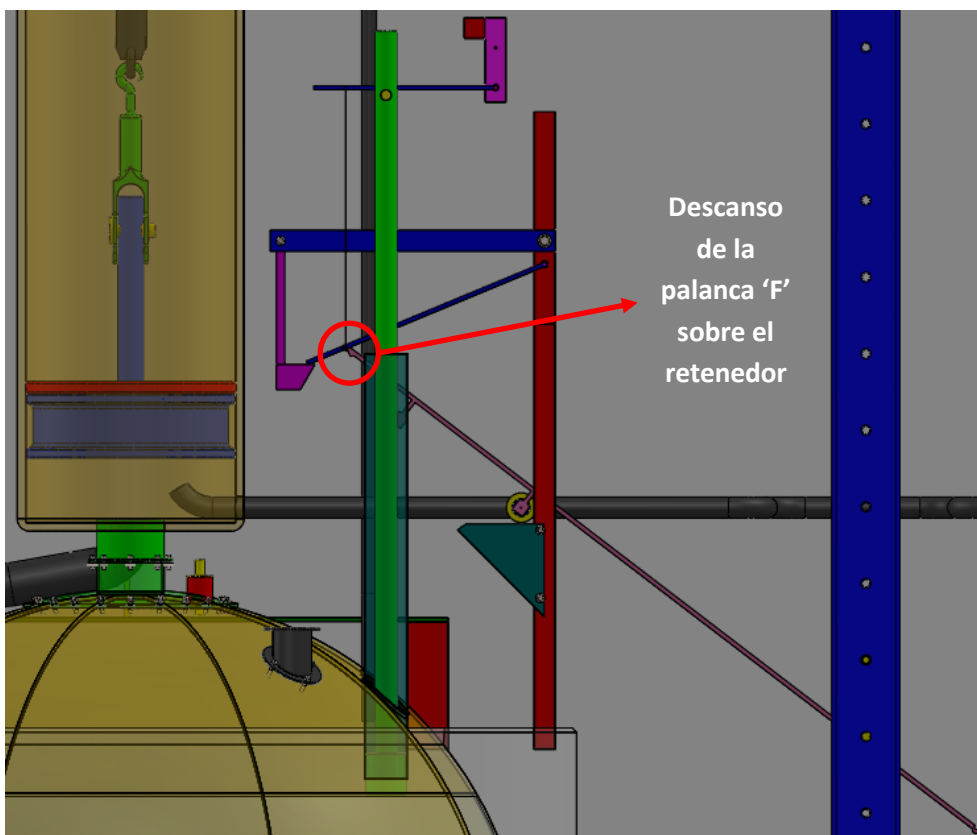


Figura 151: Válvula de inyección completamente cerrada y posición que ocupa todos sus elementos al final de la fase de potencia.

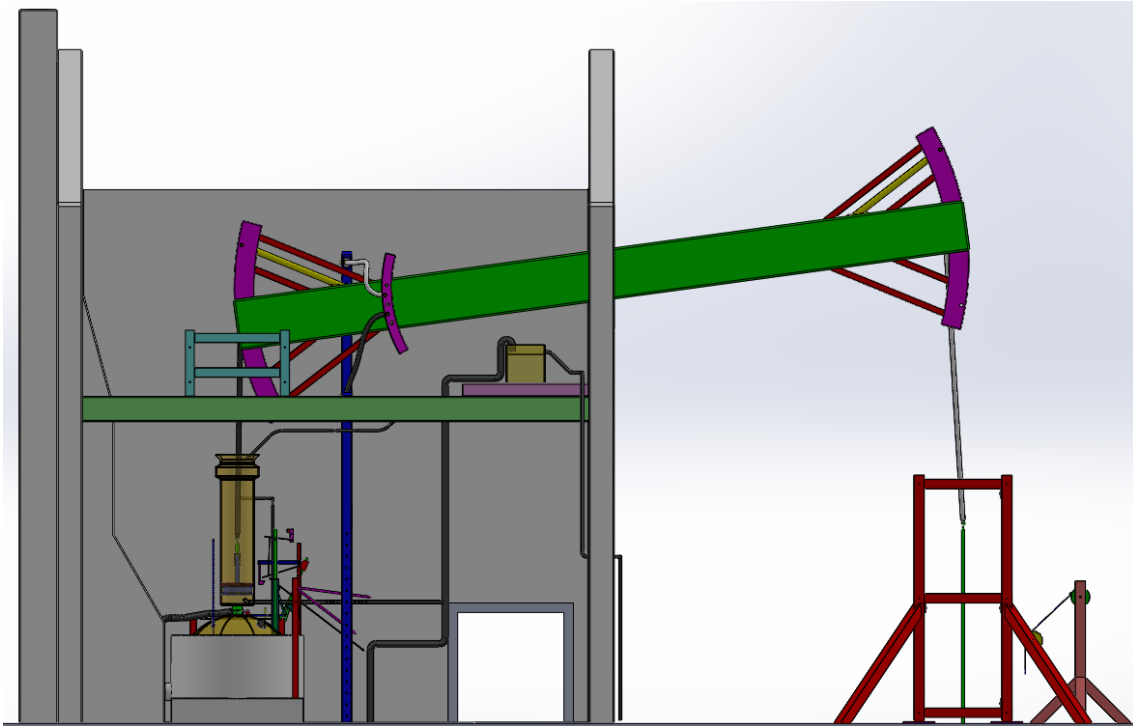


Figura 152: Vista frontal de la máquina de Newcomen en el momento en el que termina su fase de potencia.

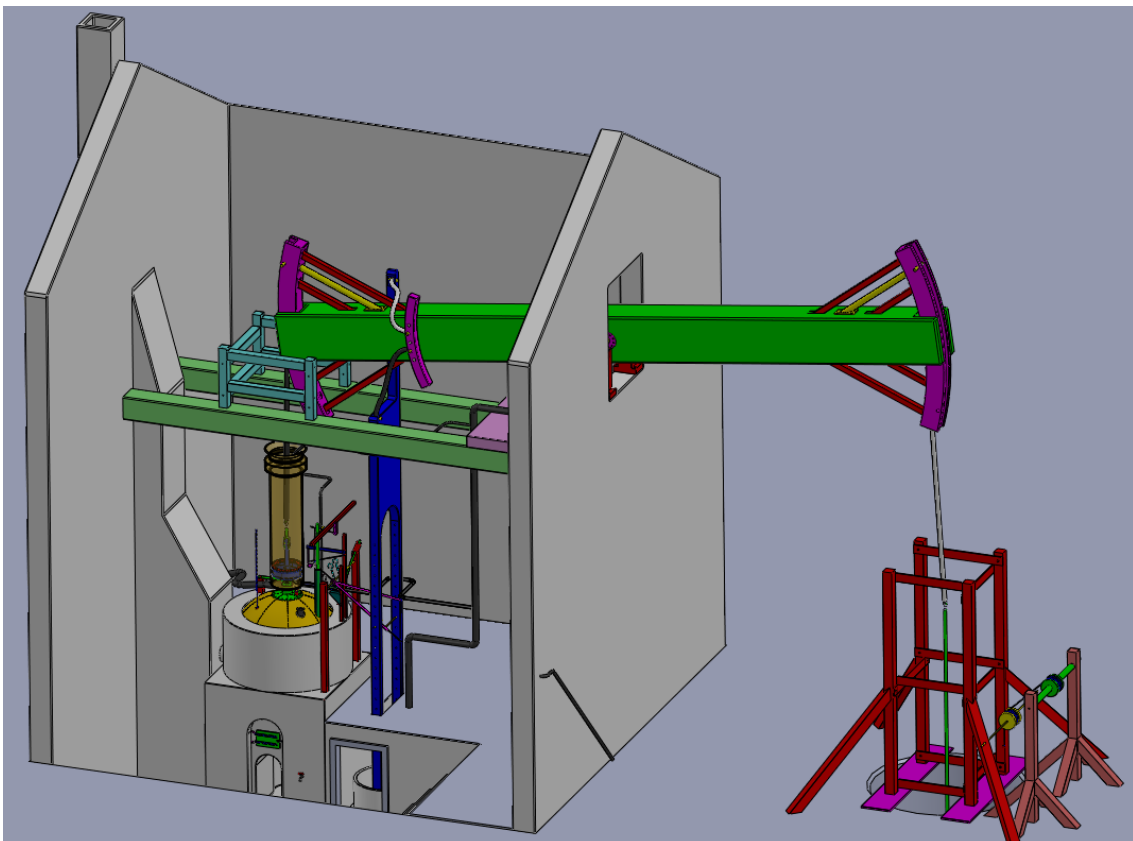


Figura 153: Vista isométrica de la máquina de Newcomen en el momento en el que termina su fase de potencia.

7.2.3. Elemento adicional. Lubricación del pistón principal.

Un elemento de la máquina de Newcomen que no se ha expuesto anteriormente durante el estudio de funcionalidad es el del sistema de lubricación del pistón principal de la máquina. Para disminuir la fricción entre el pistón y la superficie interior del cilindro principal, Newcomen empleaba el mismo agua del depósito superior y de la bomba del edificio. Este agua era introducida dentro del cilindro por su parte superior y, posteriormente, cuando el cilindro ocupaba su posición más alta, se evacuaba a través de otra tubería, también desde la parte superior del cilindro (Figura 154), hacia la caldera.

Además, ya que el agua necesaria para esta lubricación era mucho menor que la que la tubería era capaz de suministrar, hacía falta una llave de paso con una apertura muy leve para que el flujo del agua hacia el cilindro fuese muy lento (mucho menor que la que la bomba del edificio y el depósito superior eran capaces de aportar).

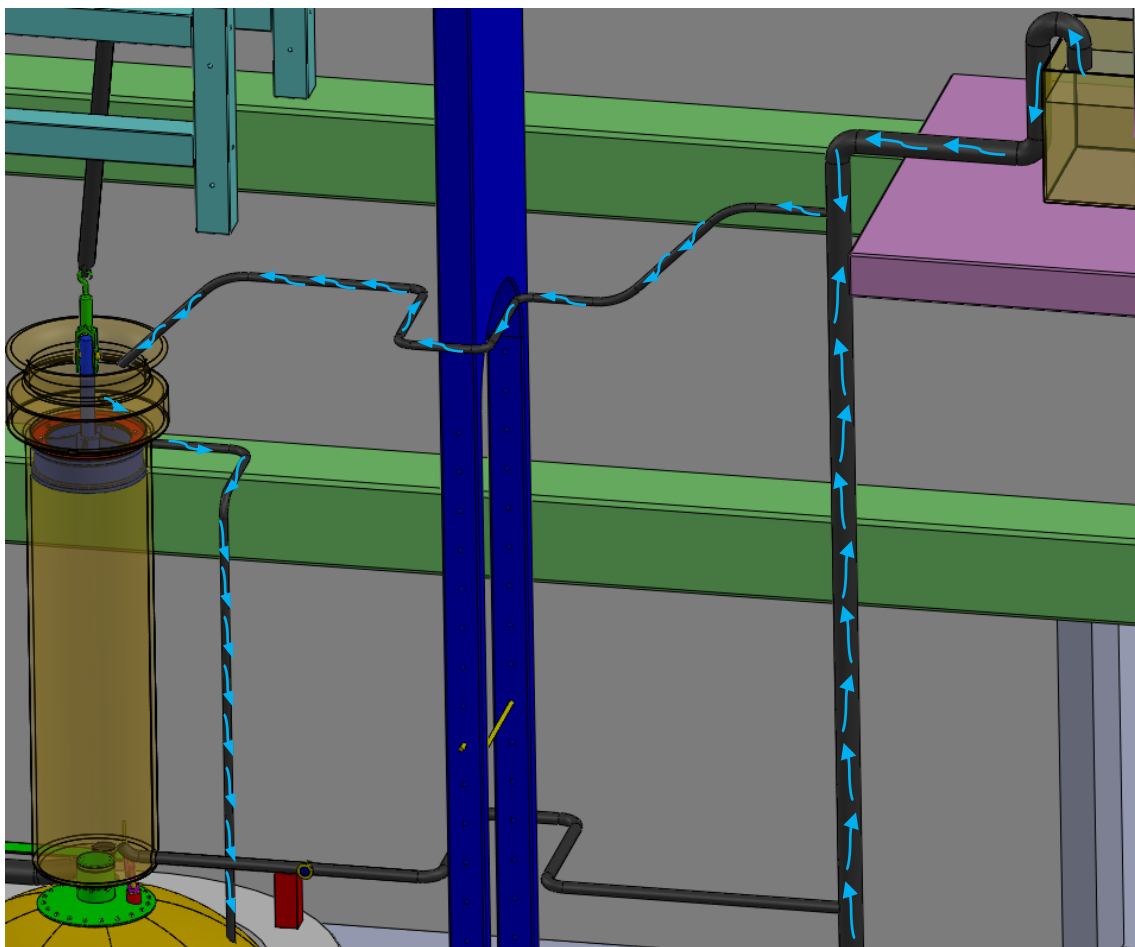


Figura 154: Flujo del agua de lubricación del pistón a través de la tubería maestra, y su rama que va a la parte superior del cilindro principal, y de la tubería de recirculación hacia la caldera.

7.3. Estudio de funcionalidad de la máquina de Watt.

Como ya se mencionó en la introducción del estudio funcional, aquí se procede a explicar únicamente los componentes que Watt añadió a la máquina de Newcomen para mejorar su rendimiento térmico.

7.3.1. Camisa Térmica.

El primer elemento que Watt implementó en su máquina de vapor para mejorar el rendimiento térmico de la máquina de Newcomen fue una camisa térmica que encapsulase el cilindro principal.

Como se puede apreciar en la Figura 155, tanto esta camisa como el cilindro están cerrados por sus partes superiores, lo que significa que esta máquina deja de ser considerada como una “máquina de vapor atmosférica” (como sí era el caso de la de Newcomen). Debido a ello, en la máquina de Watt, el vapor generado en la caldera podía ser utilizado para ejercer presión sobre el pistón en ambas direcciones, tanto para arriba como para abajo (Figura 157 y 158).

Además, parte del vapor generado va constantemente hacia la camisa térmica (Figura 156), en lugar de al interior del cilindro, para mantenerla caliente constantemente. Esto consiguió que el vapor en el cilindro no perdiese calor durante la operación de la máquina.

Asimismo, la camisa térmica estaba hecha de un material que tuviese una muy baja transmisividad térmica (madera de balsa, por ejemplo), para asegurarse que la cantidad de calor perdido por el vapor en su interior fuese el menor posible.

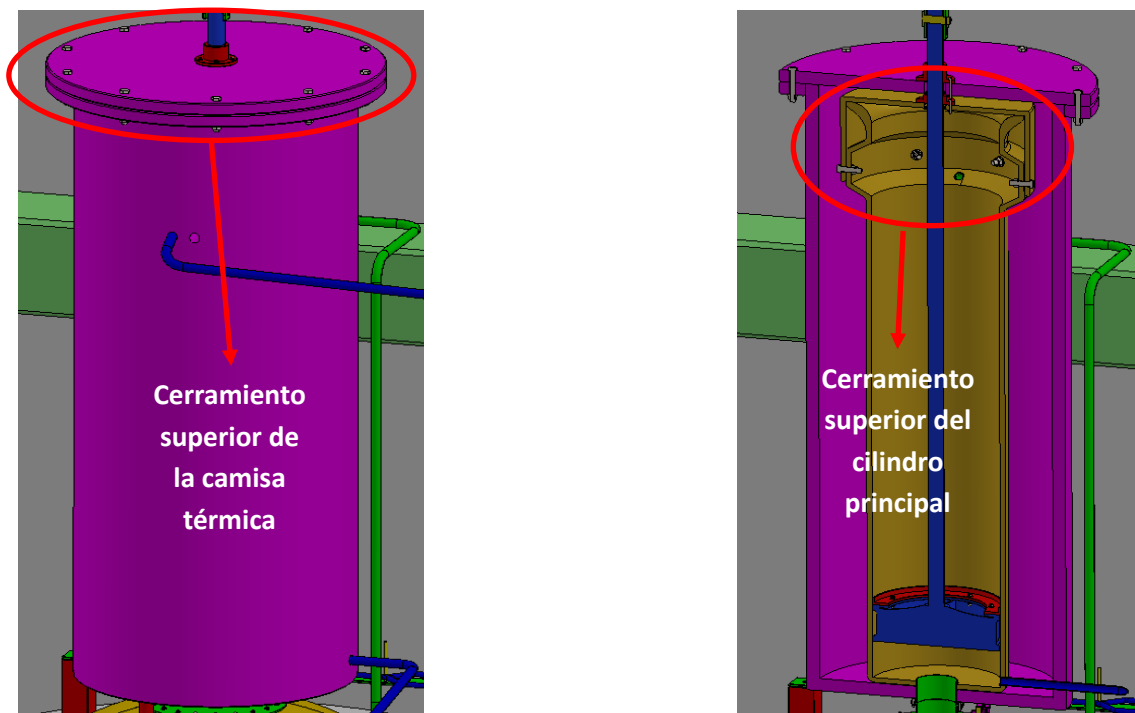


Figura 155: Exterior de la camisa térmica que encapsula al cilindro principal de la máquina de Watt (izquierda) y vista de sección, en la que se observa el cerramiento del cilindro principal (derecha).

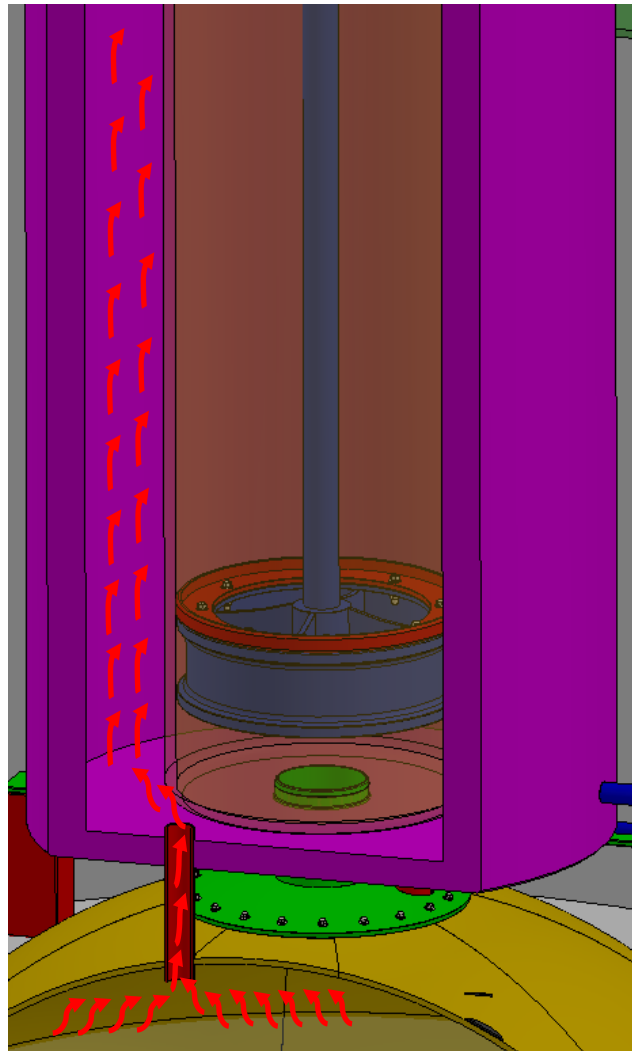


Figura 156: Flujo de parte del vapor generado en la caldera, hacia el interior de la camisa térmica.

De la misma forma que el vapor entraba al cilindro, a través de las tuberías de acceso (en verde en las Figura 157 y 158), hacía falta otras por las que pudiese salir (en azul en las Figura 157 y 158), ya que, en la máquina de Watt, la condensación del vapor no se realizaba en el cilindro, sino en un condensador aparte.

Aunque en el modelo simplificado que se ha realizado para la máquina de Watt no se haya representado el sistema de válvulas que gobernaba la introducción y extracción del vapor en el cilindro durante las fases de funcionamiento de ascenso y descenso del pistón, se expone el flujo del vapor del cilindro durante estas dos fases.

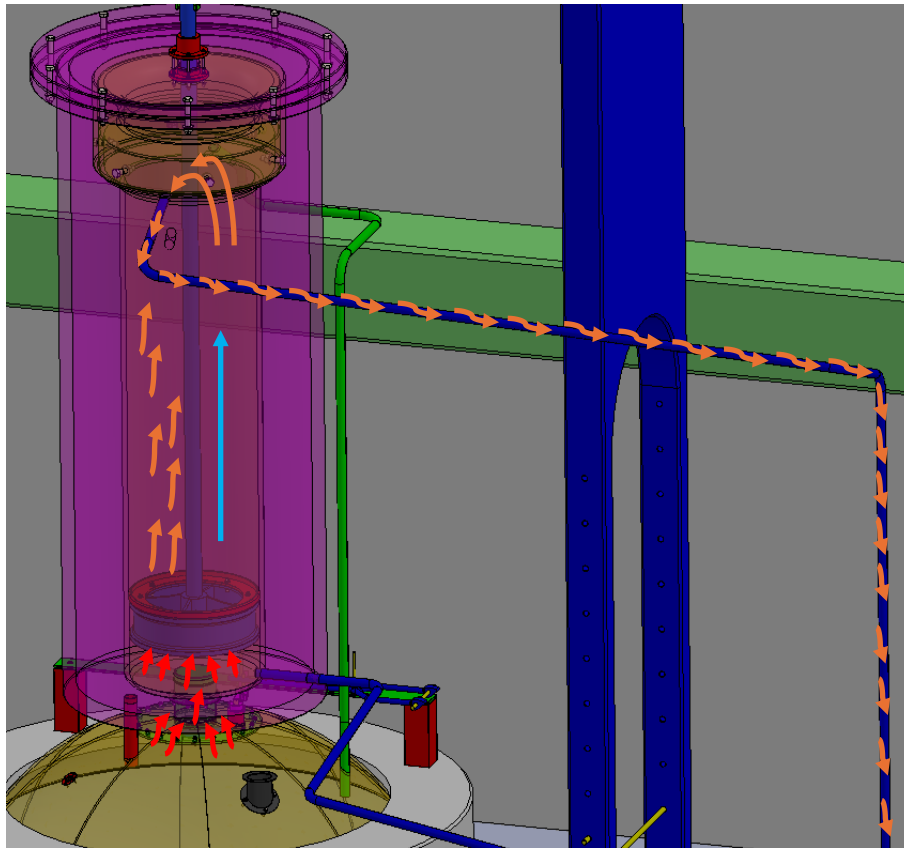


Figura 157: Flujo del vapor que *entra* y *sale* del cilindro, durante la fase de *ascenso* del pistón.

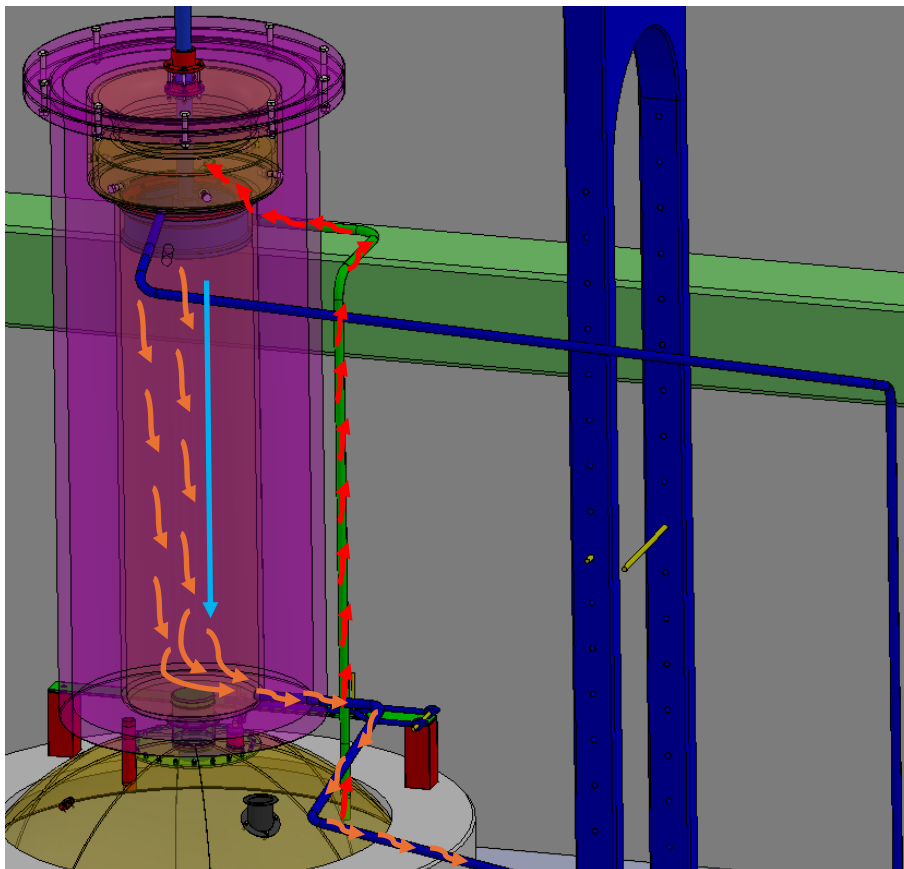


Figura 158: Flujo del vapor que *entra* y *sale* del cilindro, durante el *descenso* del pistón.

7.3.2. Condensador.

Aquí se procede a explicar el funcionamiento del segundo elemento que Watt añadió sobre la máquina de Newcomen para mejorar su rendimiento térmico: el condensador (Figura 159). Éste consistía en tres cilindros que estaban sumergidos en una bañera de agua fría (Figura 160 y 161).

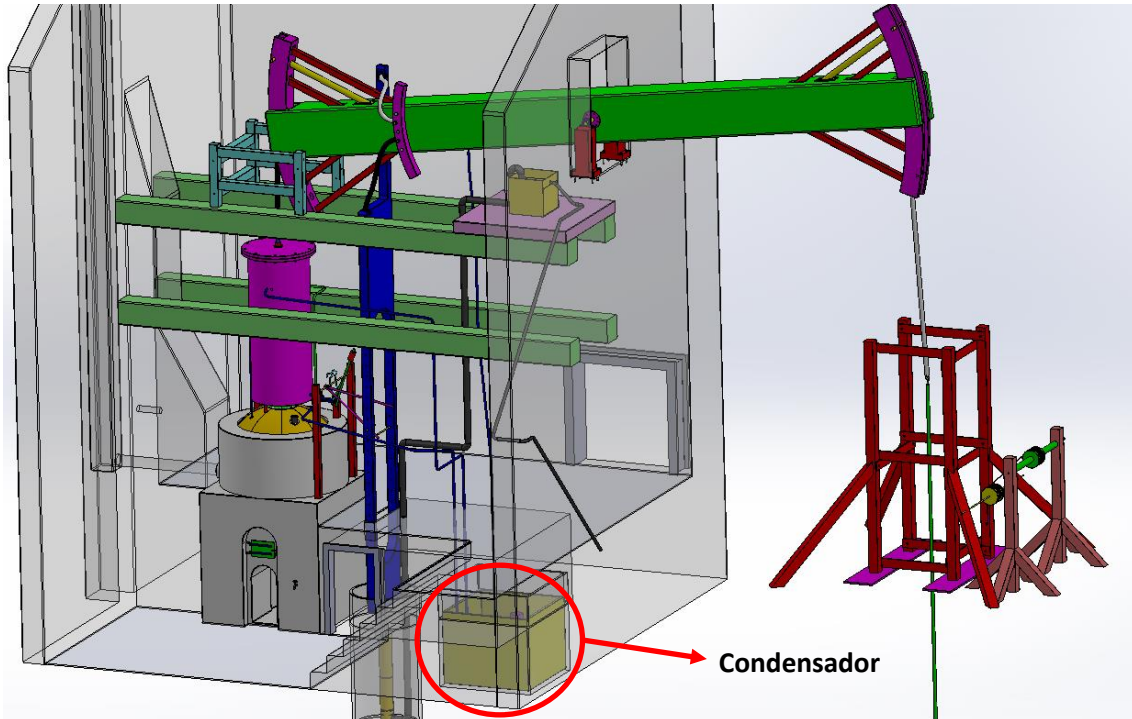


Figura 159: Localización del condensador en el edificio.

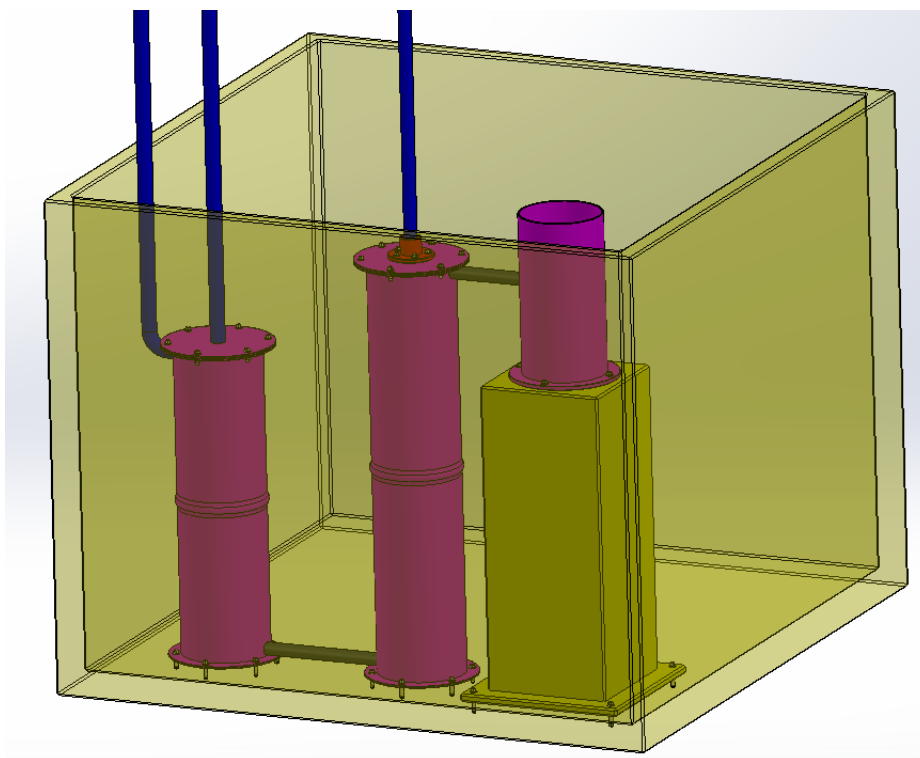


Figura 160: Bañera de refrigeración (en amarillo) y los cilindros (en morado) que componen el condensador.

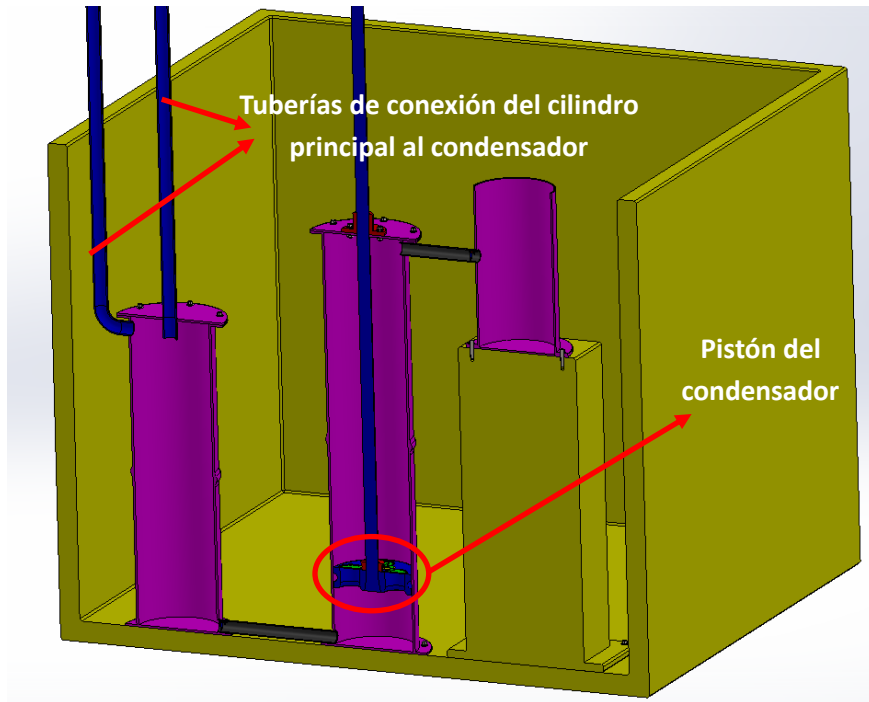


Figura 161: Vista de sección del condensador, en la cual se pueden observar todos sus elementos.

El orden en el que el vapor fluía a través de estos tres cilindros era el siguiente. Primero, el vapor procedente del cilindro principal de la máquina entraba en el cilindro donde se realizaba la propia condensación del vapor, conocido como el cilindro de condensación (Figura 162). Esto ocurría debido a que el agua fría del baño refrigerante mantenía el interior del cilindro lo suficientemente frío, aunque también era posible que en ocasiones se inyectase parte de esta agua fría dentro del cilindro para acelerar la condensación del vapor.

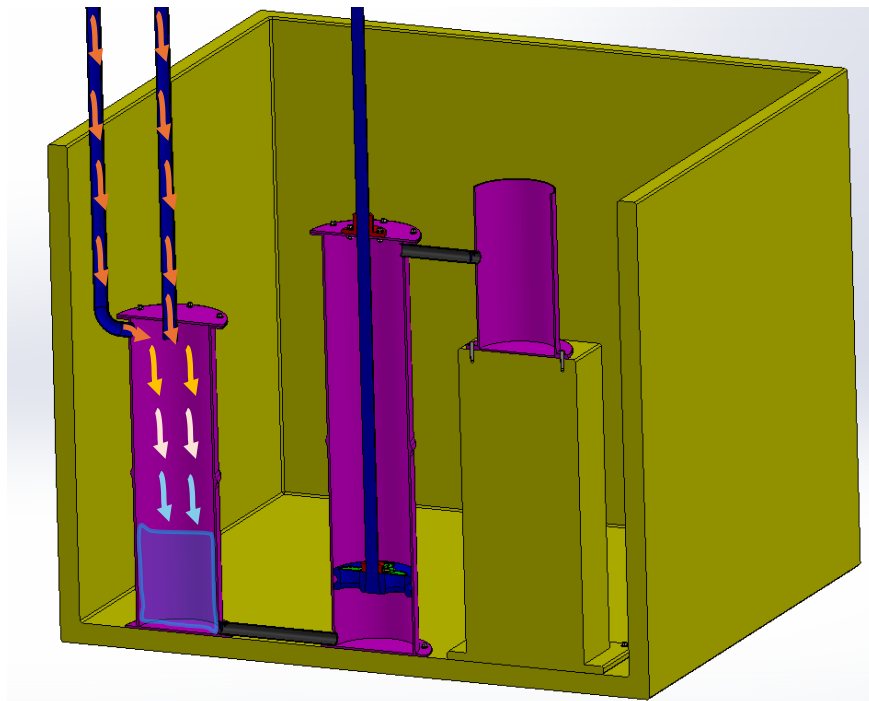


Figura 162: Flujo del vapor del cilindro hacia el cilindro de condensación y acumulación del agua generada por la condensación del vapor.

Luego, el agua generada, debido a esta condensación, se acumulaba en la base de este primer cilindro (Figura 163) y, a través de una tubería y su válvula antirretorno, se trasladaba hacia el cilindro de bombeo, acumulándose igualmente en la base de este segundo cilindro (Figura 164). Como su propio nombre indica, en este cilindro el agua se bombeaba desde abajo hacia arriba a través del pistón de bombeo del condensador, el cual era desplazado por la viga elevadora de la máquina. Ello era posible gracias a las válvulas tipo escotilla (Figura 165), que permitían el flujo del agua debajo del pistón en sentido ascendente, cuando el desplazamiento del pistón era descendente, e impedía el flujo del agua encima del pistón en sentido descendente, cuando el desplazamiento del pistón era ascendente.

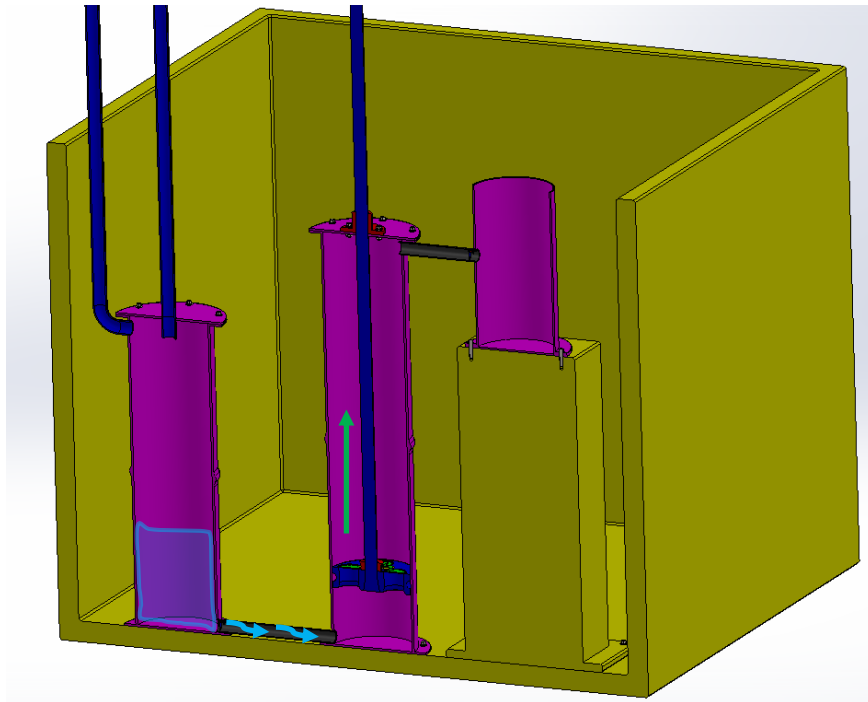


Figura 163: Flujo del agua del cilindro de condensación al cilindro de bombeo, durante la primera fase ascendente del pistón.

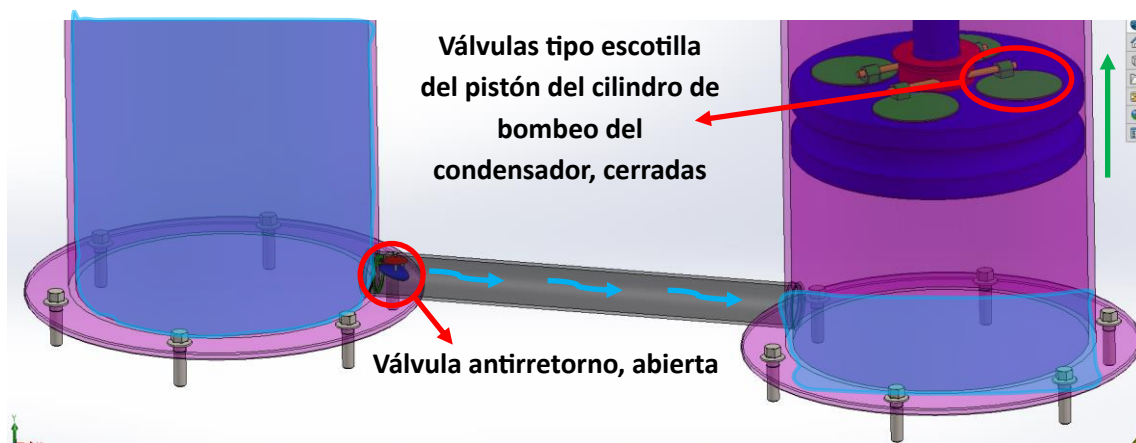


Figura 164: Válvula antirretorno de la tubería entre los cilindros de condensación y de bombeo abierta y válvulas tipo escotilla del pistón cerradas, durante la primera fase ascendente del pistón.

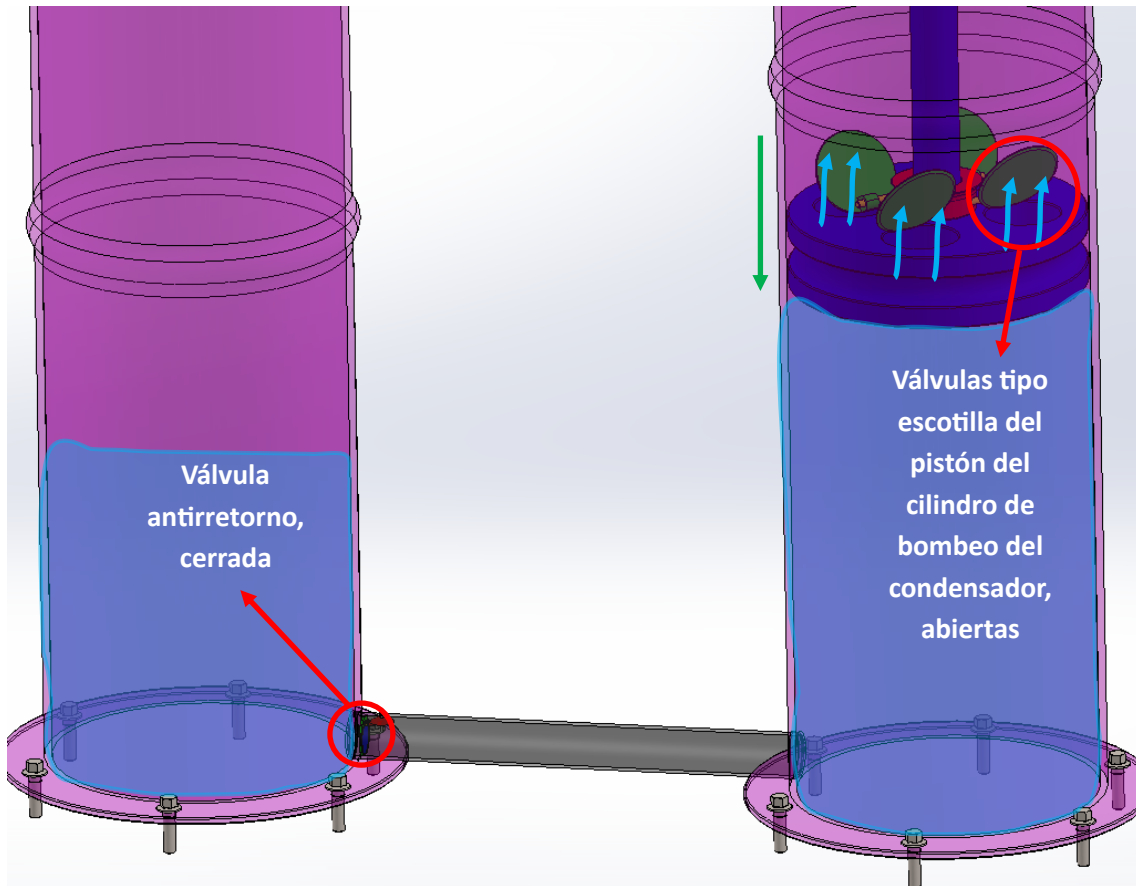


Figura 165: *Flujo del agua* desde la parte inferior a la superior del cilindro de bombeo, pasando a través del pistón, con sus válvulas tipo escotilla abiertas y la válvula antirretorno de la tubería de conexión entre los cilindros de condensación y de bombeo cerrada, durante la primera fase *descendente* del pistón.

El agua bombeada en el segundo cilindro era posteriormente desplazada, a través de otra tubería y válvula antirretorno, hacia el cilindro de acumulación (Figura 166 y 167). Éste era llenado del agua generada a través de la condensación del vapor (Figura 168). Finalmente, mediante una bomba de vacío, este tercer cilindro desaguaba el agua que se iba acumulando en él, a través de una tubería, hacia un pozo de agua caliente.

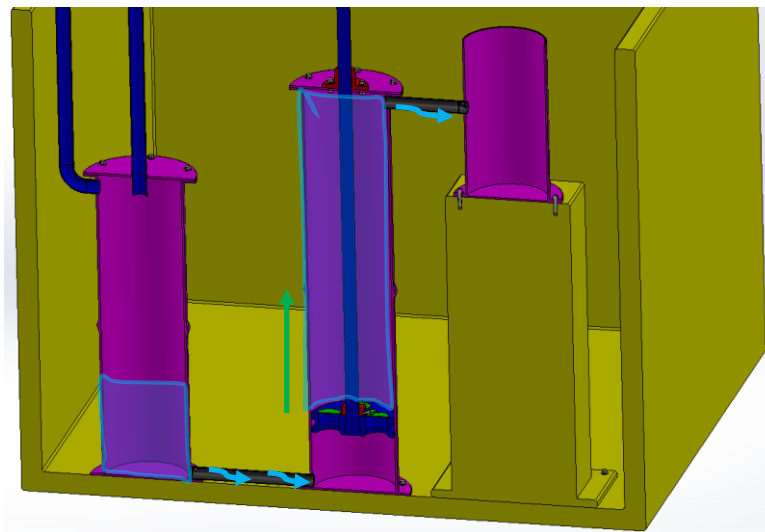


Figura 166: *Flujo del agua* del cilindro de condensación al cilindro de bombeo y de éste al de acumulación, durante la segunda fase *ascendente* del pistón.

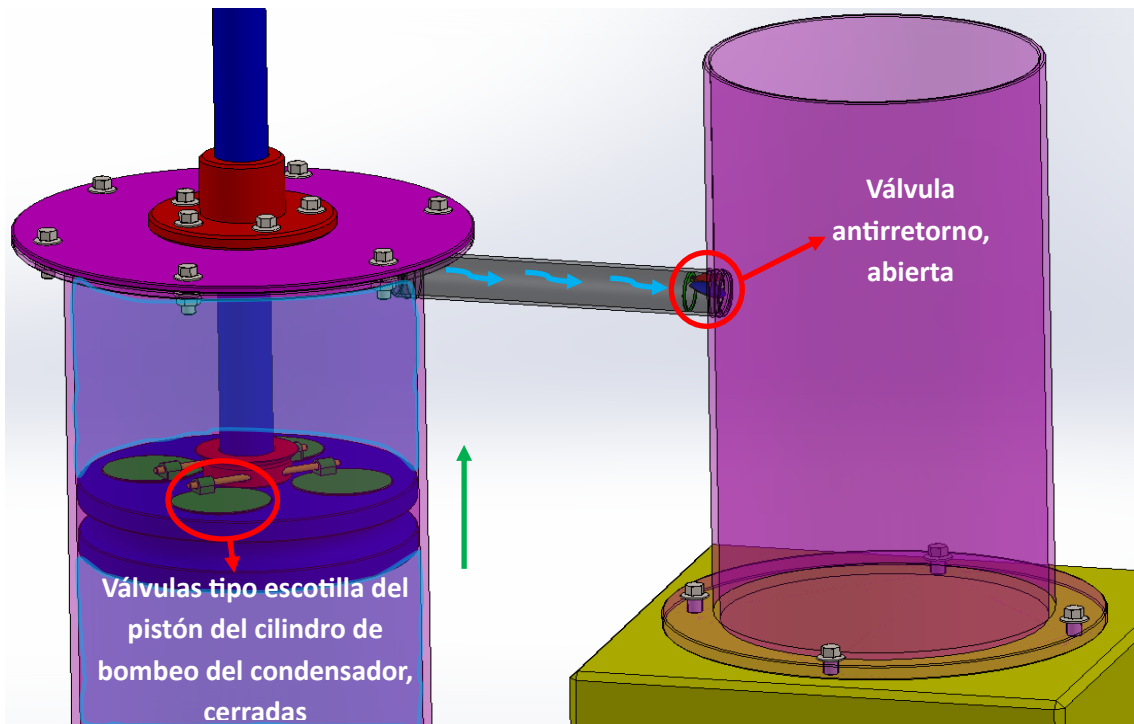


Figura 167: Válvula antirretorno de la tubería entre los cilindros de bombeo y de acumulación abierta y válvulas tipo escotilla del pistón cerradas, durante la segunda fase *ascendente* del pistón.

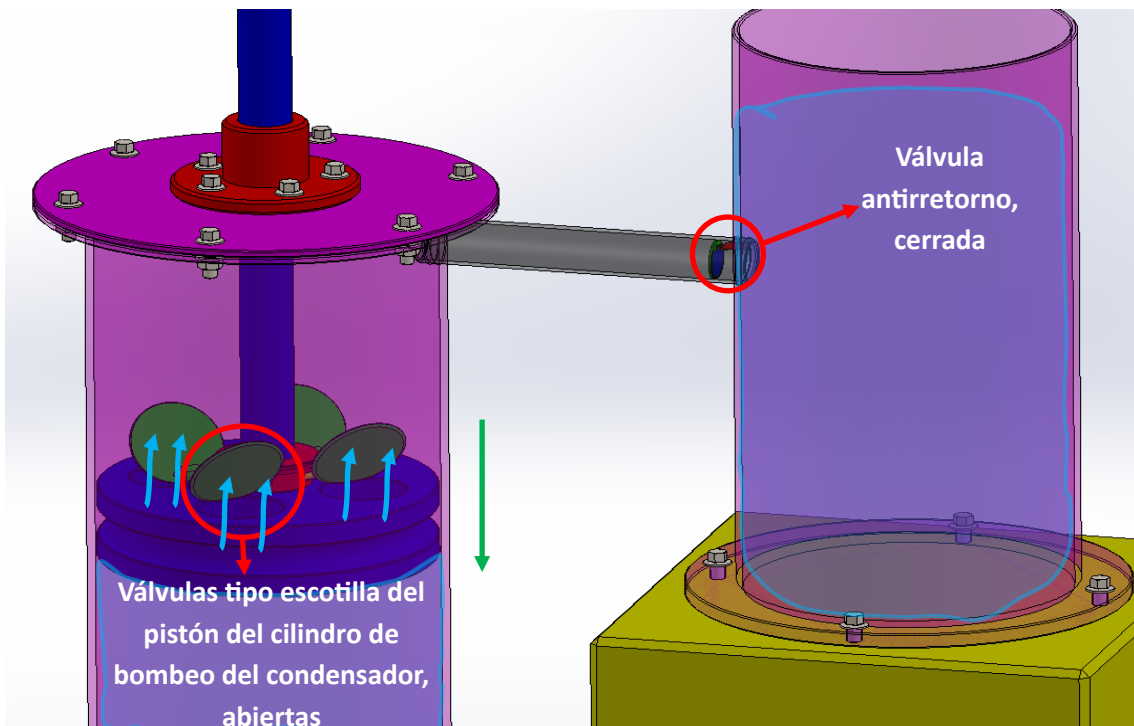


Figura 168: *Flujo del agua* desde la parte inferior a la superior del cilindro de bombeo, pasando a través del pistón, con sus válvulas tipo escotilla abiertas y la válvula antirretorno de la tubería de conexión entre los cilindros de bombeo y de acumulación cerrada, durante la segunda fase *descendente* del pistón.

7.4. Características funcionales de las máquinas de Newcomen y de Watt.

Para terminar con el estudio de funcionalidad de ambas máquinas, se exponen sus características principales de funcionamiento, en la Tabla 5: Presión Media Efectiva, velocidad del pistón, caudal de bombeo, potencia entregada y coste de construcción. El rendimiento de ambas máquinas será desglosado más adelante, en el Capítulo 9.

Nótese aquí que la última fila de la siguiente tabla hace referencia al coste de construcción de ambas máquinas si fuesen construidas en el año 2025, teniendo en cuenta la inflación histórica desde el año en el que fueron construidas.

Tabla 5: Resumen de las principales características del funcionamiento de las máquinas de vapor de Newcomen y de Watt.

CARACTERÍSTICAS	UNIDAD	MÁQUINA DE NEWCOMEN [14]	MÁQUINA DE WATT [17]
Presión Media Efectiva (P.M.E.)	<i>lb/in²</i>	9,4	10
	<i>kPa</i>	65	70
Velocidad del pistón	<i>Carreras/min</i>	12	29,5
	<i>m/s</i>	0,4	1,2
Caudal de bombeo	<i>Galón imperial/min</i>	120	680
	<i>l/s</i>	9,09	51,5
Potencia entregada	<i>Caballos de Vapor (CV)</i>	2,77	18
	<i>Vatio (W)</i>	2.038,49	13.422,60
Coste de construcción	<i>Libra (£)</i>	1.000 – 2.000	1.500 – 3.000
	<i>*Equivalencia 2025* [26]</i>	174.962,88 - 349.925,75	262.444,31 – 524.888,63

Atendiendo a los parámetros obtenidos para ambas máquinas se puede observar que la máquina de Watt tenía una capacidad de bombeo 5,7 veces mayor y aumentó la potencia en un factor de 6,5 veces, respecto a la máquina de Newcomen. Sin embargo, los costes de construcción de la máquina de Watt superaban en, aproximadamente, 1,5 veces más que los de la máquina de Newcomen. Por lo tanto, dado que el precio de adquisición de éstas era inferior al de aquellas, aunque Watt mejorase con creces la eficacia y la eficiencia de las máquinas de Newcomen, éstas seguían copando la mayor parte del mercado, hasta el vencimiento de la patente de Watt, en 1804, como se puede observar en la Figura 8.

8. Estudio Estructural de las máquinas de vapor.

A continuación, se presenta el análisis estructural que se ha realizado sobre el modelo obtenido de las máquinas de vapor de Newcomen y de Watt, el cual consiste en un análisis estático lineal de la cadena que conecta el pistón principal del cilindro de la máquina con la viga elevadora. Se ha realizado un análisis estructural únicamente de la cadena, puesto que se ha considerado uno de los elementos de mayor interés para comprender su resistencia mecánica durante el funcionamiento de las máquinas, y debido a que realizar este análisis para todos los componentes queda fuera del propósito principal de esta sección de la memoria: el de establecer una metodología general a seguir para las simulaciones que se deseen realizar sobre otros componentes de interés de las máquinas.

Para realizar dicho estudio, se ha utilizado el módulo de simulación estructural que el programa SolidWorks trae incorporado, denominado “*SolidWorks Simulation*”, el cual emplea el *Método de Elementos Finitos (MEF)*.

8.1. Objeto.

El propósito del presente estudio es el de evaluar si la cadena modelada sería capaz de soportar las fuerzas a las que estaría sometida durante el funcionamiento de la máquina modelada y, además, el de establecer una metodología general a seguir para futuras simulaciones estructurales que se deseen realizar sobre otros componentes de interés de las máquinas de Newcomen y de Watt.

8.2. Modelo.

El modelo utilizado para el análisis estructural consta del ensamblaje *TFM-MV-NW_01-13-00_ASSY-CADENALADOINTERIOR_VO_CadenaEnDetalle*, el cual trata de la cadena que conecta la viga elevadora con el pistón del cilindro principal de las máquinas de vapor de Newcomen y de Watt (Figura 169).



Figura 169: Modelo utilizado para la simulación estructural de la cadena conectora del pistón principal y la viga elevadora.

8.2.1. Geometría.

Como se puede observar, esta cadena consta de una de 33 eslabones conectados en serie entre sí, entrando en contacto de forma tangencial unas con otras. Además, la posición de la cadena, que se puede observar en la Figura 169, coincide con aquella en la que ésta sufrirá los máximos esfuerzos. Es decir, cuando se genere el vacío dentro del cilindro principal y el pistón “tire” con la máxima fuerza de esta cadena.

La Figura 170 y la Tabla 6 muestran las medidas generales de los eslabones diseñados para la cadena:

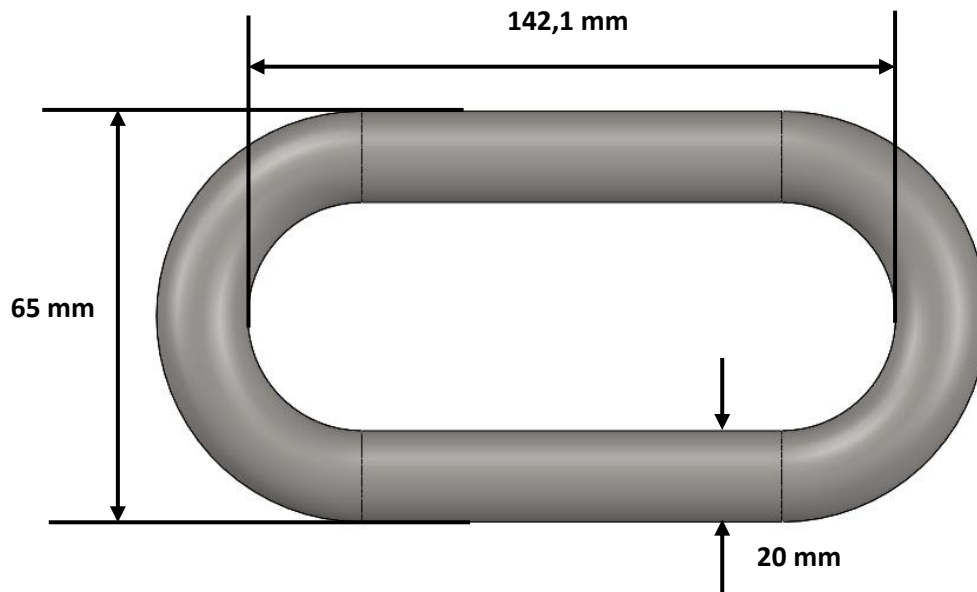


Figura 170: Medidas de los eslabones diseñados para la cadena simulada.

Tabla 6: Medidas otorgadas al diseño de los eslabones para la cadena simulada.

Diámetro, D (mm)	Longitud interna, L (mm)	Anchura, A (mm)
20	142,1	65

8.2.2. Materiales Asignados.

El material utilizado para los eslabones de la cadena diseñada trata de Acero AISI 1020, el cual está disponible en la base de datos de SolidWorks (Tabla 7) y tiene las siguientes propiedades mecánicas:

Tabla 7: Propiedades del material utilizado para la cadena de eslabones simulada (Acero AISI 1020).

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	200000	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.29	N/D
Módulo cortante	77000	N/mm ²
Densidad de masa	7900	kg/m ³
Límite de tracción	420.507	N/mm ²
Límite de compresión		N/mm ²
Límite elástico	351.571	N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica	1.5e-05	/K
Conductividad térmica	47	W/(m·K)
Calor específico	420	J/(kg·K)
Cociente de amortiguamiento del material		N/D

8.2.3. Modelo Resultante.

Tras definir la geometría de la cadena diseñada y el material asignado a los eslabones que la conforman, los datos a destacar del modelo resultante son los siguientes:

- **Densidad del material:** 7900 kg/m³
- **Módulo Elástico del material:** 200 GPa
- **Límite Elástico del material:** 351,571 MPa
- **Peso de la cadena:** 33,1 kg

8.3. Preparación de la Simulación.

A continuación, se presenta la simulación que se ha realizado mediante el módulo *SolidWorks Simulation*, para la cual se establecieron las sujeciones, cargas y mallado que se exponen en los siguientes subapartados:

8.3.1. Sujeciones.

Lo primero que se establece en la simulación del modelo son las sujeciones de los elementos fijos, es decir a los nodos que no van a sufrir desplazamiento o deformación alguna.

Para ello, se establece una sujeción fija a la superficie del eslabón que estará en contacto con el pasador que sujeta la cadena con la viga elevadora de la máquina.

Como se puede observar en la Figura 171, se han fijado todos los grados de libertad de esta superficie, impidiendo así el movimiento y rotación en los tres ejes (x, y, z) del espacio.

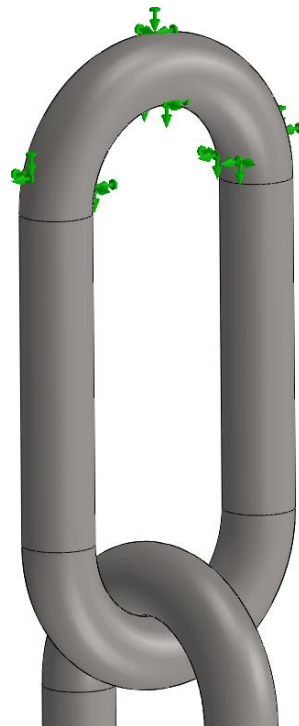


Figura 171: Sujeciones establecidas a la cadena.

8.3.2. Cargas.

Una vez establecidas las sujeciones de la estructura, se procede a aplicar las diferentes cargas que actúan sobre ella:

8.3.2.1. Gravedad.

Primero, se debe tener en cuenta el propio peso de la cadena, por lo que se aplica una fuerza gravitatoria (g), de $9,81 \text{ m/s}^2$, sobre la normal al plano ortogonal de la cadena (Figura 172).

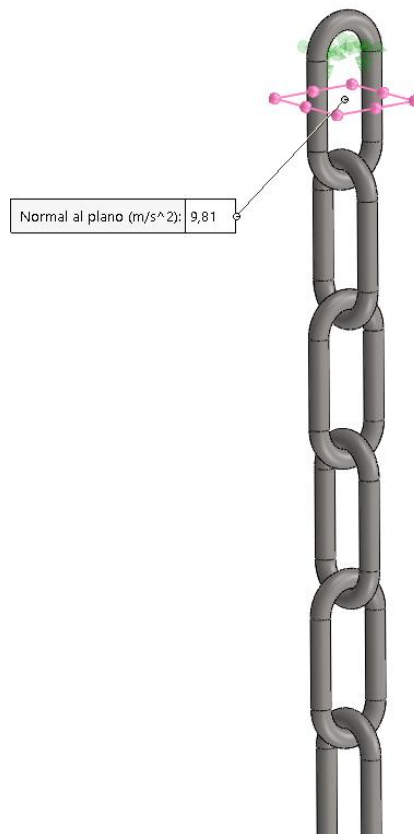


Figura 172: Fuerza gravitatoria aplicada sobre la cadena.

8.3.2.2. Peso de los elementos que cuelgan de la cadena.

Además del propio peso de la cadena, se añade una fuerza vertical correspondiente al peso de todos los elementos que cuelgan sobre la cadena simulada. La Figura 173 recoge todos los elementos que cuelgan de la cadena, mientras que la Tabla 8 recoge las masas de cada uno de ellos, así como la masa total.

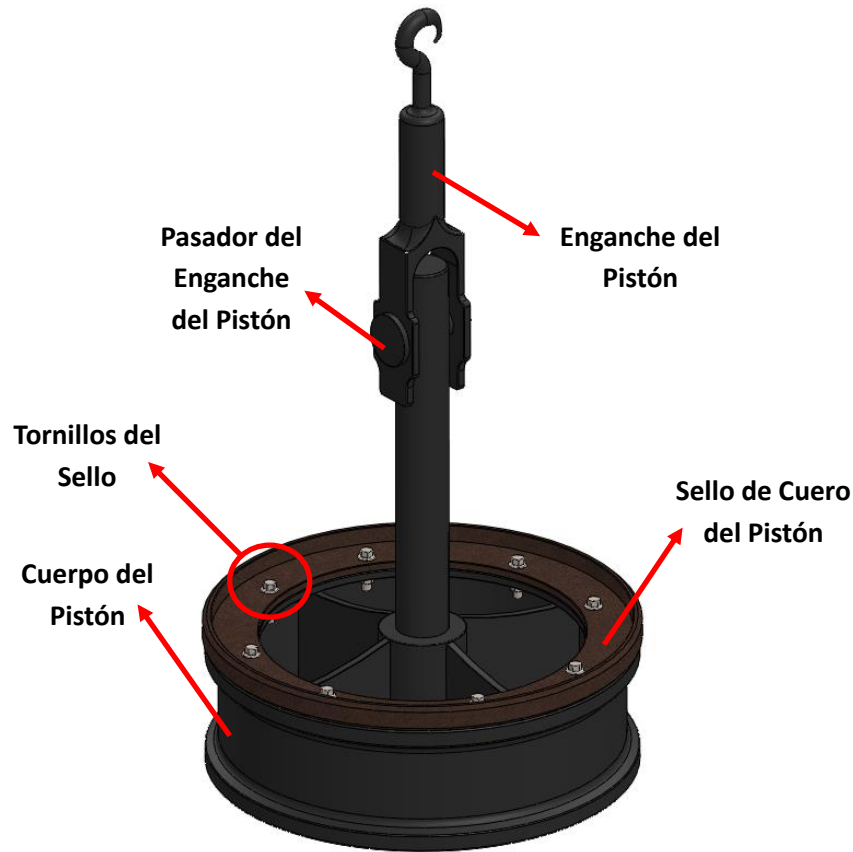


Figura 173: Elementos que cuelgan de la cadena simulada.

Tabla 8: Desglose de las masas de los elementos que cuelgan sobre la cadena.

ELEMENTO	MASA, m (kg)
Cuerpo del Pistón	61,274
Sello de Cuero del Pistón	1,135
Tornillos del Sello (x8)	0,3
Enganche del Pistón	4,478
Pasador del enganche del pistón	0,743
TOTAL	67,93

Habiendo obtenido la masa total de los elementos que cuelgan de la cadena, se calcula el peso total que actúa sobre la misma:

$$\text{Peso, } P = m \cdot g \tag{8.1}$$

$$P = 67,93 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 666,4 \text{ N}$$

Una vez conocido el peso total de los elementos que cuelgan de la cadena, este dato es introducido, como una fuerza vertical actuando en el último eslabón de la cadena (Figura 174).

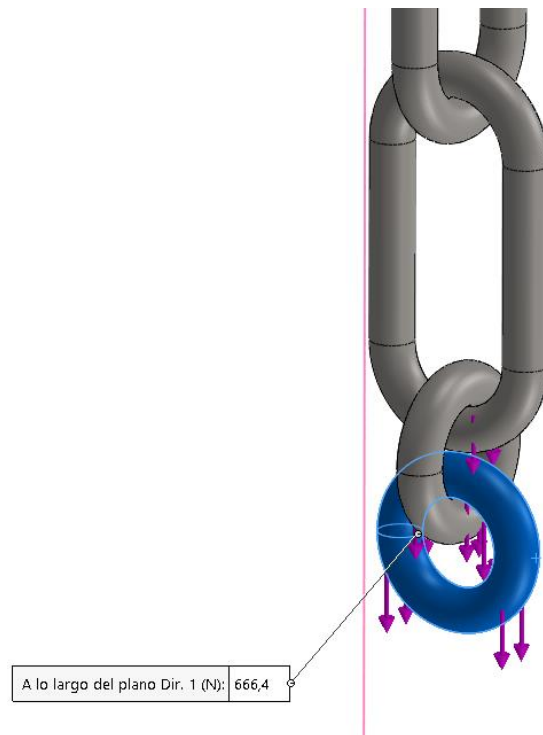


Figura 174: Peso aplicado sobre la cadena.

8.3.2.3. Fuerza resultante del vacío generado en el cilindro principal.

La última fuerza a considerar, que actúa sobre la cadena, es aquella causada por el balance de presiones entre la parte superior e inferior del pistón dentro del cilindro principal de la máquina.

Como ya se explicó en el Capítulo 7, hay un momento del funcionamiento de la máquina en el que se genera un vacío dentro del cilindro principal, debajo del pistón. Aunque esto no signifique necesariamente que la presión debajo del pistón sea igual a cero, puesto que el vacío no era ideal, para este estudio se va a suponer este caso como verdadero, ya que así se estaría simulando el escenario más desfavorable, es decir, en el que la cadena soporta la máxima carga.

Así, la presión resultante (P) que actúa sobre el pistón es una de 101 kPa (1 atmósfera) en sentido descendente. Además, del modelo de SolidWorks del pistón, obtenemos el área de superficie (A) del pistón.

Luego, se calcula la fuerza (F) que la atmósfera ejerce sobre el pistón y, por ende, sobre la cadena, de la siguiente forma:

$$F = P \cdot A \tag{8.2}$$

$$F = 101 \text{ kPa} \cdot 0,13739652 \text{ m}^2 = \mathbf{13,88 \text{ kN}}$$

Una vez conocida la fuerza que ejerce la atmósfera sobre el pistón y la cadena, este dato es introducido, como una fuerza vertical actuando sobre el último eslabón de la cadena (Figura 175).

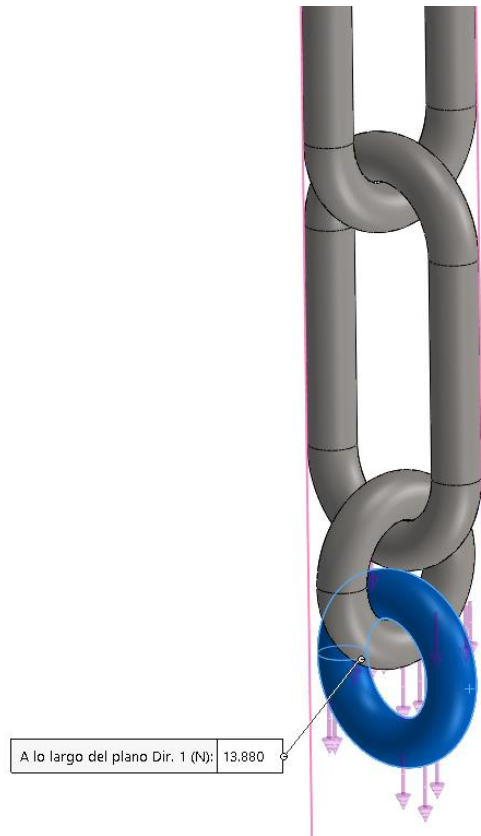


Figura 175: Fuerza que actúa sobre la cadena, debida al balance de presiones en el pistón del cilindro cuando se genera un vacío en la parte inferior del pistón.

8.3.3. Mallado.

Para este estudio se ha utilizado una malla de tipo sólida, como se puede observar en la Figura 176. Además, en la Tabla 9 se pueden observar todos los datos de la malla generada.

Tabla 9: Datos de la malla generada para la simulación.

Malla Detalles	
Nombre de estudio	Análisis estático 1* (-Predeterminado-)
DetallesTipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla basada en curvatura de combinado
Puntos jacobianos para malla de alta calidad	16 puntos
Control de malla	Definida
Tamaño máx. de elemento	18,2949 mm
Tamaño mín. de elemento	6,09822 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	151198
Número total de elementos	85426
Cociente máximo de aspecto	4,327
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	99,7
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	0
Porcentaje de elementos distorsionados	0
Número de elementos distorsionados	0
Mallar de nuevo las piezas fallidas de forma independiente	Desactivar
Reutilizar la malla para sólidos idénticos	Desactivar
Número de sólidos que han reutilizado la malla	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:09
Nombre de computadora	FJ-1998

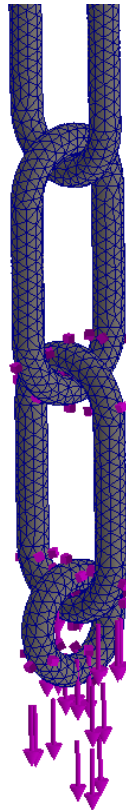


Figura 176: Malla generada para la simulación.

8.4. Resultados de la Simulación.

Al ejecutar la simulación, se obtiene que la máxima tensión experimentada en la cadena es de 252 MPa (Figura 177), lo cual se traduce en un factor de seguridad del diseño de la cadena de 1,40 (Figura 178).

Esto significa que, habiendo simulado el comportamiento de la cadena bajo las peores condiciones posibles de funcionamiento, el límite elástico, de 352 MPa, nunca se sobrepasará, por lo que la cadena con los eslabones observados en la Figura 170 debería de ser segura y nunca ceder. Sin embargo, si hubiese que ceñirse a estándares de prevención actuales, como los establecidos en la “*NTP 861: Eslingas de cadena*”, se deduce que el factor de seguridad para este tipo de cadenas es de 4, posicionando, así, al diseño aquí presentado muy por debajo de los estándares de seguridad actuales.

Por lo tanto, aunque el factor de seguridad de 1,40 muestre que la cadena no debería de sobrepasar nunca el límite elástico, si se deseara construir la máquina modelada, se debería de cambiar el diseño de la cadena de eslabones para que se encuentre por encima del factor de seguridad de 4, establecido en la *NTP 861*.

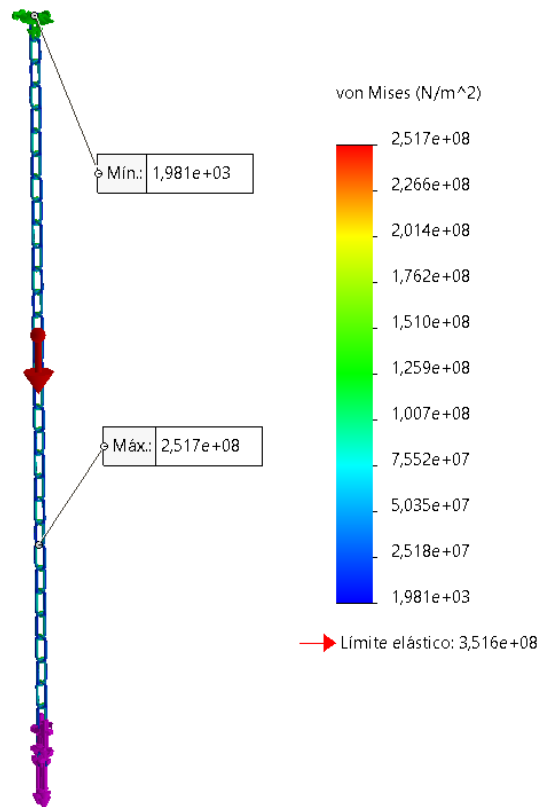


Figura 177: Resultados de la Tensiones de von Mises en la cadena.

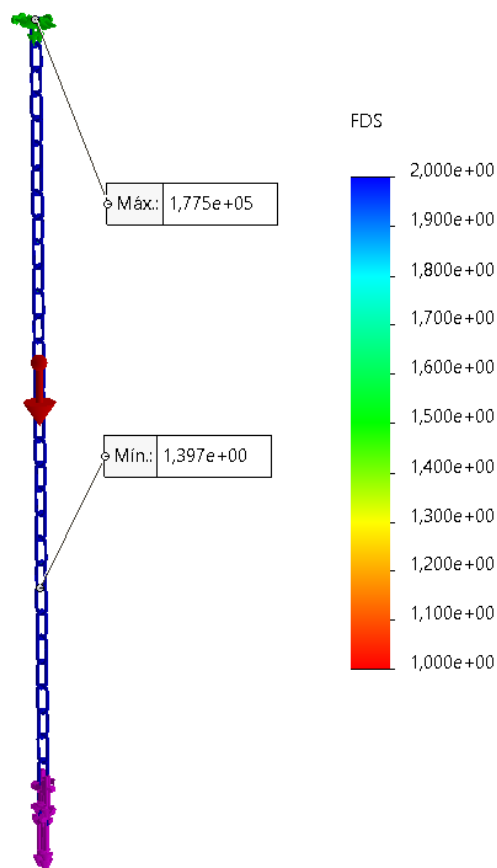


Figura 178: Resultados del Factor de Seguridad de la cadena.

Además, atendiendo a los resultados de los desplazamientos, se ha obtenido un desplazamiento máximo de 3,93 mm, en el extremo de la cadena en el que se cuelga el pistón principal (Figura 179), lo cual era esperable dadas las sujeciones y cargas establecidas durante la preparación de la simulación.

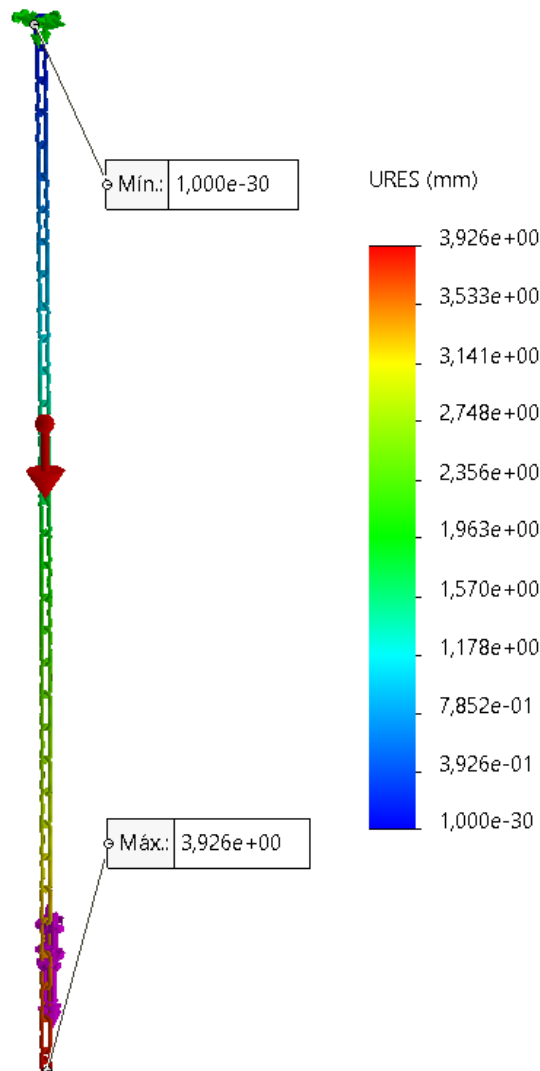


Figura 179: Resultados de los Desplazamientos de la cadena.

8.5. Resumen y evaluación de los resultados del estudio estructural de las máquinas de vapor.

En la Tabla 10 se resumen los resultados que se han obtenido al realizar la simulación en SolidWorks del comportamiento de la cadena bajo la acción de las fuerzas expuestas en los anteriores subapartados, como parte del estudio estructural.

Tabla 10: Resumen de los resultados de la simulación realizado de la cadena, durante el estudio estructural de las máquinas de vapor modeladas.

PARÁMETRO	RESULTADO
Tensión de von Mises máxima, σ_{\max}	252 MPa
Desplazamiento máximo, d_{\max}	3,93 mm
Factor de Seguridad, FDS	1,397

Atendiendo a estos resultados, se pueden observar los siguientes aspectos:

Primero, que los **desplazamientos**, siendo el máximo de **3,93 mm**, son muy leves y, por lo tanto, aceptables.

Segundo, que la máxima **tensión** experimentada por la cadena, bajo las condiciones de trabajo más desfavorables, será de **252 MPa**, de tal modo que nunca experimentará tensiones mayores al límite elástico del acero AISI 1020 del que están hechos los eslabones de la cadena, de 352 MPa.

Por último, que, a pesar de que el diseño de la cadena simulada tenga un **FDS** de **1,40**, este parámetro podría mejorarse, hasta un valor que se aproxime a 4, realizando el diseño según las pautas establecidas en los estándares actuales de prevención, como la “*NTP 861: Eslingas de cadena*”, en el caso en el que se desee fabricar las máquinas modeladas o un prototipo.

9. Estudio Termodinámico de las máquinas de vapor.

En este capítulo de la presente memoria se procede a exponer el análisis termodinámico que se ha realizado de las máquinas de vapor de *Newcomen* y de *Watt*. El objetivo de dicho estudio fue el de hallar la eficiencia térmica de cada una de las máquinas y, así, poder estimar la magnitud de las mejoras térmicas que introdujo *James Watt*.

En este estudio se utilizó el software de cómputo numérico, *MATLAB* (Figura 180), para automatizar y agilizar los cálculos. Mientras que en este capítulo se expone la metodología seguida y las ecuaciones utilizadas, en los Anexos V y VI se pueden observar los códigos generados en *MATLAB*.



Figura 180: Logotipo del software de computación numérica, *MATLAB* [27].

9.1. Introducción al análisis termodinámico de las máquinas.

Antes de comenzar con los cálculos, es importante tener un cierto grado de comprensión de cómo realizar el estudio. Para ello, se han identificado todas las distintas pérdidas que tenían estas máquinas, ya que la eficiencia térmica no puede ser hallada sin la previa obtención de estos parámetros. De esta forma, se ha establecido que las pérdidas de las máquinas pueden ser divididas en: las pérdidas de la caldera, las térmicas del cilindro y condensador, las asociadas a la fricción mecánica de los componentes y a las fugas de agua de las bombas. La Figura 181 muestra, de forma visual, el modelo termodinámico obtenido para el estudio, mientras que en la Tabla 11 se pueden consultar todos los parámetros utilizados y calculados.

Además, algunos de los datos necesarios para poder realizar este estudio termodinámico han sido tomados de los artículos [28] y [29], ya que ninguna de las fuentes utilizadas hasta el momento aporta esta información.

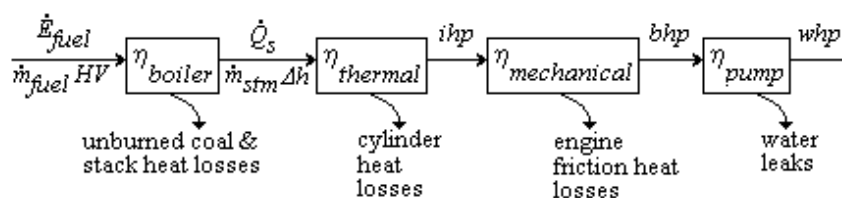


Figura 181: Modelo de bloques representativo del modelo termodinámico de las máquinas de *Newcomen* y *Watt* [30]. *Nota:* Consultar la Tabla 11 para ver la traducción y significado de estos parámetros del inglés al español.

Tabla 11: Parámetros utilizados y calculados en el estudio termodinámico de las máquinas de Newcomen y de Watt.

Parámetro (Español)	Parámetro (Inglés)	Definición
$D_{bomba-mina}$		Diámetro interior de los cilindros de las bombas de la mina.
D_{cil-pr}		Diámetro interior del cilindro principal de la máquina.
\dot{E}_{carb}	\dot{E}_{fuel}	Potencia disponible en el carbón usado como combustible.
$\dot{E}_{carb-Vatio}$		Potencia disponible en el carbón usado como combustible, en Vatios.
E_i		Energía introducida a la máquina.
E_o		Energía entregada por la máquina.
H_f		Entalpía de líquido saturado del agua.
H_g		Entalpía de vapor saturado del agua.
H_i		Entalpía del agua introducida a la caldera.
H_o		Entalpía del vapor producido en la caldera.
Δh		Cambio de entalpía durante el proceso de evaporización.
$L_{carrera}$		Longitud de la carrera de los pistones del cilindro principal y de las bombas de la mina.
$L_{deb-recorr}$		Holgura debajo del pistón principal, entre las caras inferiores del pistón y del cilindro.
$L_{enc-recorr}$		Holgura encima del pistón principal, entre las caras superiores del pistón y del cilindro.
\dot{m}_{ag-v}	\dot{m}_{stm}	Caudal másico del vapor generado en la caldera.
\dot{m}_{carb}	\dot{m}_{fuel}	Caudal másico del carbón introducido a la caldera.
N		Velocidad de la máquina.
$\bar{p}_{cilindro} (MEP)$		Presión Media Efectiva del interior del cilindro principal.
$P_{ag-cald}$		Densidad del agua suministrada a la caldera.
P_{carb}		Densidad del carbón usado como combustible.
\dot{Q}_v	\dot{Q}_s	Potencia calorífica suministrada por la caldera al cilindro principal.
$V_{ag-a-bombear-mina}$		Volumen de agua que las bombas de las minas impulsarían si fuesen 100% eficientes.
$V_{ag-a-bombear-mina-b1}$		Volumen de agua que desplazaría la bomba más profunda de la mina, si fuese 100% eficiente.
$V_{ag-a-bombear-mina-b2}$		Volumen de agua que desplazaría la bomba menos profunda de la mina, si fuese 100% eficiente.
$V_{ag-bombeada-mina}$		Volumen del agua que las bombas de la mina logran elevar.
$\dot{V}_{ag-bombeada-mina}$		Flujo volumétrico del agua que las bombas de la mina logran elevar.
\dot{V}_{ag-v}		Flujo volumétrico del agua evaporada en la caldera.
$V_{bomba-mina}$		Volumen interior del cilindro de las bombas de la mina.
\dot{V}_{carb}		Flujo volumétrico del carbón alimentado a la caldera.
$V_{deb-recorr}$		Volumen de holgura debajo del pistón cuando este termina su carrera de descenso.
$V_{enc-recorr}$		Volumen de holgura encima del pistón cuando este termina su carrera de ascenso.
$V_{f-ag-cald}$		Volumen específico del agua suministrada a la caldera.
ΔV_{recorr}		Diferencia entre los volúmenes de holgura superior e inferior.
VC_{carb}	HV	Valor Calorífico medio del carbón en Reino Unido.
$W_{bomba-mina}$		Trabajo realizado al elevar las bombas de la mina, en un recorrido.

$\dot{W}_{bomba-mina-bhp}$	bhp	Potencia de freno, entregada por la bomba.
$\dot{W}_{bomba-mina-Vatio}$		Potencia del agua impulsada por la bomba, en Vatios.
$\dot{W}_{bomba-mina-whp}$	whp	Potencia del agua impulsada por la bomba.
W_{cil-pr}		Trabajo de bombeo aportado por el pistón del cilindro principal.
$\dot{W}_{cil-pr-ihp}$	ihp	Potencia de bombeo aportada por el pistón del cilindro principal.
W_{t-ag}		Peso del agua a impulsar por las bombas de la mina.
$\gamma_{ag-mina}$		Peso específico del agua fría y fresca a desaguar de la mina.
Δz_{b1}		Profundidad a la que está colocada la bomba más profunda de la mina.
Δz_{b2}		Profundidad a la que está colocada la bomba menos profunda de la mina.
Δz_{mina}		Profundidad total de la mina.
Δz_{tot}		Suma de las profundidades de las bombas 1 y 2 de la mina.
η_{bombeo}	η_{pump}	Eficiencia del sistema de bombeo.
$\eta_{caldera}$	η_{boiler}	Eficiencia de la caldera.
η_{global}		Eficiencia global de la máquina.
$\eta_{mecánica}$	$\eta_{mechanical}$	Eficiencia mecánica de la máquina.
$\eta_{térmica}$	$\eta_{thermal}$	Eficiencia térmica de la máquina.

9.2. Metodología de cálculo.

En los siguientes subapartados se muestran únicamente los cálculos para la máquina de Newcomen, ya que la metodología de cálculo seguida para ambas máquinas es exactamente la misma y lo único que varía entre ambos son los valores de los datos utilizados. Finalmente, en el Apartado 9.3 se comparan los resultados finales obtenidos para las dos máquinas.

9.2.1. Análisis de la caldera.

La principal causa de pérdidas energéticas en la caldera proviene principalmente de todo el calor que contienen los gases que son producto de la combustión y el cual no es transferido al agua de la caldera, ya que se escapa a través de la chimenea del edificio. Otra fuente principal de pérdidas es la asociada a los restos del carbón que no son completamente quemados y que contienen aun energía calorífica que se podría sustraer de él (Figura 183).

Además, otras pérdidas menores de la caldera son atribuibles a la energía térmica que no termina de transmitirse al agua y que se disipa en el propio material de la caldera, así como la imperfecta distribución del calor a lo largo de la superficie de la caldera. Así mismo, se pueden considerar las pérdidas térmicas a través del ladrillo que encapsula la caldera, aunque sean mínimas debido a la utilización del ladrillo térmico como material aislante.

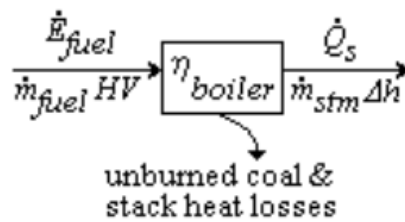


Figura 182: Representación gráfica de la eficiencia de la caldera [30].

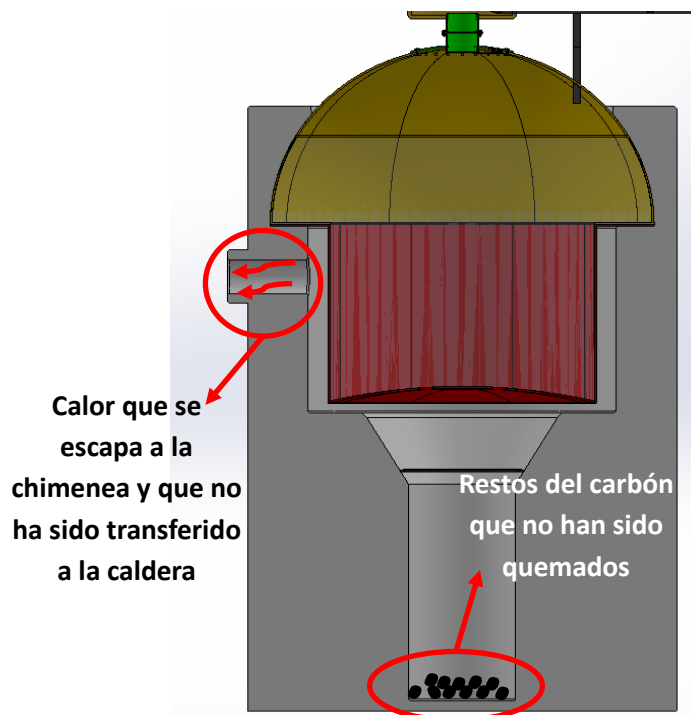


Figura 183: Principales pérdidas de eficiencia asociadas a la caldera.

La eficiencia de la caldera se obtiene de la relación entre la potencia calorífica del vapor generado (\dot{Q}_v) y la potencia química disponible por el combustible que se le alimenta a la caldera (\dot{E}_{carb}). Esto queda presentado gráficamente en la Figura 182.

$$\eta_{caldera} = \frac{\dot{Q}_v}{\dot{E}_{carb}} \quad (9.1)$$

La potencia calorífica del vapor generado en la caldera es directamente proporcional al cambio de entalpía experimentado por el agua en su proceso de evaporización (Δh), mientras que la potencia química del combustible lo es al Valor Calorífico del carbón alimentado a la caldera (VC_{carb}), luego:

$$\dot{Q}_v = \dot{m}_{ag-v} \cdot \Delta h \quad (9.2)$$

$$\dot{E}_{carb} = \dot{m}_{carb} \cdot VC_{carb} \quad (9.3)$$

Los flujos másicos del vapor generado (\dot{m}_{ag-v}) y del carbón alimentado (\dot{m}_{carb}) vienen dados por sus densidades ($\rho_{ag-cald}$ y ρ_{carb}) y flujos volumétricos (\dot{V}_{ag-v} y \dot{V}_{carb}):

$$\dot{m}_{ag-v} = \rho_{ag-cald} \cdot \dot{V}_{ag-v} \quad (9.4)$$

$$\dot{m}_{carb} = \rho_{carb} \cdot \dot{V}_{carb} \quad (9.5)$$

La densidad del agua de la caldera ($\rho_{ag-cald}$) se obtiene mediante su volumen específico ($V_{f-ag-cald}$), el cual, conocida la temperatura a la que estaba el agua suministrada a la caldera, de 54,4°C, se obtuvo de las tablas termodinámicas del vapor [31].

$$\rho_{ag-cald} = \frac{1}{v_{f-ag-cald}(54,4^{\circ}C)} = \frac{1}{1,0143 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{kg}} = 985,902 \frac{kg}{m^3} \quad (9.6)$$

Utilizando los datos de los artículos [28] y [29], obtenemos ambos flujos másicos:

$$\dot{m}_{ag-v} = \rho_{ag-cald} \cdot \dot{V}_{ag-v} \quad (9.4)$$

$$\dot{m}_{ag-v} = 985,902 \frac{kg}{m^3} \cdot 2548,52 \frac{l}{hr} \cdot \frac{1 m^3}{1000 l} = 2512,6 \frac{kg}{hr}$$

$$\dot{m}_{carb} = \rho_{carb} \cdot \dot{V}_{carb} \quad (9.5)$$

$$\dot{m}_{carb} = 38,1018 \frac{kg}{fanega} \cdot 8,5 \frac{fanegas}{hr} = 323,865 \frac{kg}{hr}$$

El cambio de entalpía del agua durante el proceso de evaporización (Δh) viene dado por la diferencia entre la entalpía de líquido saturado, a 54,4°C ($h_{f(54,4^{\circ}C)}$) y la entalpía de vapor saturado, a 0,65 bar ($h_{g(0,65bar)}$), los cuales son datos obtenidos de las tablas termodinámicas del vapor [31].

$$h_{g(0,65bar)} = 2656,77 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{f(54,4^{\circ}C)} = 227,72 \frac{kJ}{kg}$$

$$\Delta h = h_{g(0,65bar)} - h_{f(54,4^{\circ}C)} = 2656,77 \frac{kJ}{kg} - 227,72 \frac{kJ}{kg} = 2429,1 \frac{kJ}{kg} \quad (9.7)$$

El valor calorífico medio del carbón del Reino Unido (país donde fueron construidas las primeras máquinas de Newcomen y de Watt) es de 25004,5 kJ/kg, según la fuente [32]. Por lo tanto:

$$\dot{E}_{carb} = \dot{m}_{carb} \cdot VC_{carb} = 323,865 \frac{kg}{hr} \cdot 25004,5 \frac{kJ}{kg} = 8,0981 \cdot 10^6 \frac{kJ}{hr} \quad (9.3)$$

Finalizando los cálculos de la eficiencia de la caldera, obtenemos el siguiente resultado:

$$\dot{Q}_v = \dot{m}_{ag-v} \cdot \Delta h = 2512,6 \frac{kg}{hr} \cdot 2429,1 \frac{kJ}{kg} = 6,1032 \cdot 10^6 \frac{kJ}{hr} \quad (9.2)$$

$$\eta_{caldera} = \frac{6,1032 \cdot 10^6 \frac{kJ}{hr}}{8,0981 \cdot 10^6 \frac{kJ}{hr}} = 0,75366 = 75,37\% \quad (9.1)$$

9.2.2. Análisis del sistema de bombeo.

Las pérdidas asociadas al sistema de bombeo se deben, en primer lugar, a que las válvulas antirretorno no eran completamente efectivas. Esto significa que una pequeña parte del agua que se impulsaba a través de la tubería, pasando por la válvula, volvía a retroceder indeseablemente por la longitud de la tubería. En segundo lugar, dado que los métodos de fabricación de los años en los que fue construida la máquina de Newcomen no eran muy precisos, la holgura entre el pistón y la superficie interna del cilindro de la bomba era lo suficientemente grande como para que una pequeña parte del agua pasase de la cara inferior a la superior del pistón, reduciendo así la cantidad de agua impulsada por la bomba (Figura 185).

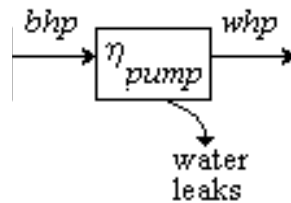


Figura 184: Representación gráfica de la eficiencia del sistema de bombeo.

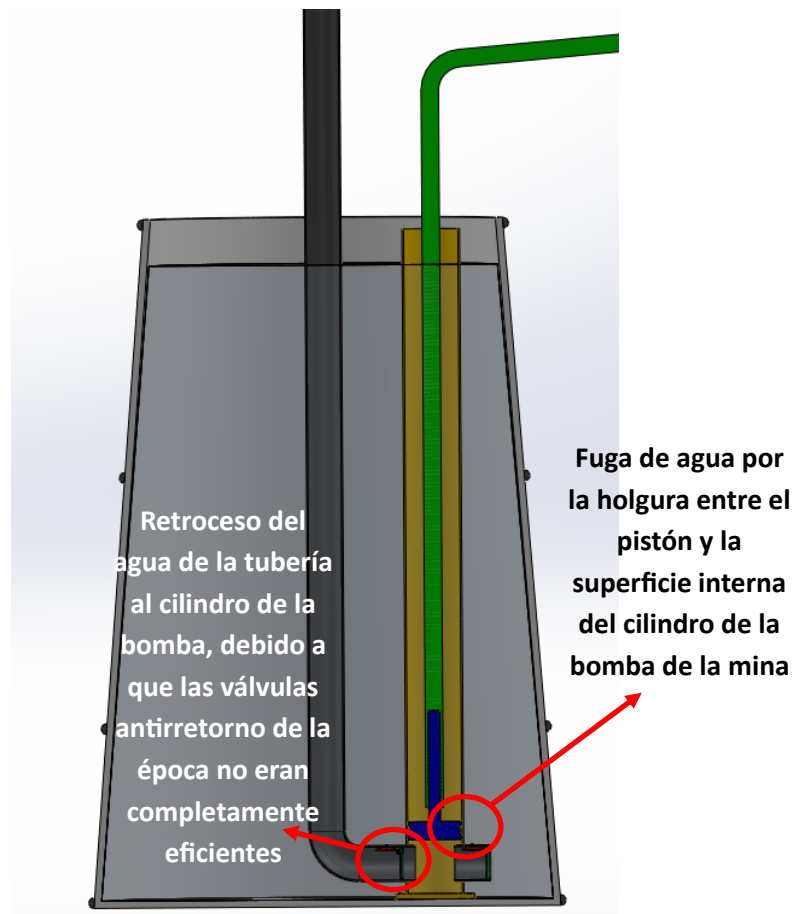


Figura 185: Pérdidas de eficiencia asociadas a las bombas.

La eficiencia del sistema de bombeo se obtiene de la relación entre la potencia de freno entregada por el sistema de bombeo ($\dot{W}_{bomba-bhp}$) y la potencia del agua impulsada por el sistema de bombeo ($\dot{W}_{bomba-whp}$). Esto queda presentado gráficamente en la Figura 184.

$$\eta_{bombeo} = \frac{\dot{W}_{bomba-whp}}{\dot{W}_{bomba-bhp}} \quad (9.8)$$

Cuando el rendimiento de una bomba se mide en términos del agua entregada, la potencia es referida en “caballos de potencia de agua”, con siglas “whp” dada su traducción al inglés “water horsepower”.

La potencia del agua impulsada por el sistema de bombeo ($\dot{W}_{bomba-whp}$) es directamente proporcional al flujo volumétrico del agua bombeada ($\dot{V}_{ag-bombeada-mina}$) y se calcula de la siguiente forma:

$$\dot{W}_{bomba-whp} = \gamma_{ag-mina} \cdot \dot{V}_{ag-bombeada-mina} \cdot \Delta z_{tot} \quad (9.9)$$

Sabiendo que el sistema de bombeo de la mina tiene dos unidades de bombas, y que la más profunda está colocada a 22,86 metros bajo la superficie mientras que la menos profunda a 12,86 metros, se deduce la altura total (Δz_{tot}):

$$\Delta z_{tot} = \Delta z_{b1} + \Delta z_{b2} = 22,86m + 12,86m = 35,72 m \quad (9.10)$$

El peso específico del agua fresca de las minas ($\gamma_{ag-mina}$) es un dato obtenido de la fuente [30]:

$$\gamma_{ag-mina} = 9802,27 \frac{N}{m^3}$$

Es sabido que el flujo volumétrico del agua bombeada ($\dot{V}_{ag-bombeada-mina}$) es de 9,09 litros/segundo (Tabla 5), por lo que:

$$\dot{V}_{ag-bombeada-mina} = 9,09 \frac{l}{s} \cdot 60 \frac{s}{min} \cdot \frac{1 m^3}{1000 l} = 0,5454 \frac{m^3}{min} \quad (9.11)$$

Luego, la potencia del agua impulsada por el sistema de bombeo ($\dot{W}_{bomba-whp}$) será:

$$\begin{aligned} \dot{W}_{bomba-whp} &= \gamma_{ag-mina} \cdot \dot{V}_{ag-bombeada-mina} \cdot \Delta z_{tot} \quad (9.9) \\ \dot{W}_{bomba-whp} &= 9802,27 \frac{N}{m^3} \cdot 0,5454 \frac{m^3}{min} \cdot 35,72 m = 190,965 \frac{kN \cdot m}{min} \\ \dot{W}_{bomba-whp} &= 190,965 \frac{kN \cdot m}{min} \cdot \frac{1 whp}{44,762 \frac{kN \cdot m}{min}} = 4,2662 whp \end{aligned}$$

Por otro lado, la potencia necesaria para elevar la bomba a la velocidad de la máquina, de 12 carreras por minuto, se calcula en las unidades análoga a la de una máquina rotatoria: “potencia de freno”, con siglas “bhp” dada su traducción al inglés “brake horsepower”. Así, la potencia de freno entregada por el sistema de bombeo es calculada como:

$$\dot{W}_{bomba-bhp} = W_{bomba} \cdot N \quad (9.12)$$

El trabajo realizado por la bomba (W_{bomba}), en una carrera del pistón, es igual al producto de la fuerza que esta ejerce sobre el agua que impulsa (W_{t-ag}) y la distancia que recorre el pistón de la bomba ($L_{carrera}$):

$$W_{bomba} = W_{t-ag} \cdot L_{carrera} \quad (9.13)$$

Mientras que el parámetro $L_{carrera}$ es un dato conocido, de 1,791 metros por carrera, W_{t-ag} se calcula de la siguiente manera:

$$W_{t-ag} = \gamma_{ag-mina} \cdot V_{agua-a-bombear} \quad (9.14)$$

El volumen de agua a bombear ($V_{agua-a-bombear}$) es la suma de los volúmenes de las columnas de agua que existen sobre las dos bombas del interior de la mina:

$$V_{agua-a-bombear} = V_{agua-a-bombear-b1} + V_{agua-a-bombear-b2} \quad (9.15)$$

$$V_{agua-a-bombear} = \frac{\pi \cdot D_{bomba-mina}^2}{4} \cdot (\Delta z_{b1} + \Delta z_{b2}) \quad (9.16)$$

$$V_{agua-a-bombear} = \frac{\pi \cdot (0,21 \text{ m})^2}{4} \cdot (22,86 \text{ m} + 12,86 \text{ m}) = 1,2372 \text{ m}^3$$

Luego, continuando los cálculos de la potencia de freno ($\dot{W}_{bomba-bhp}$), obtenemos:

$$W_{t-ag} = \gamma_{ag-mina} \cdot V_{agua-a-bombear} \quad (9.14)$$

$$W_{t-ag} = 9802,27 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} \cdot 1,2372 \text{ m}^3 = 12127,37 \text{ N}$$

$$W_{bomba} = W_{t-ag} \cdot L_{carrera} \quad (9.13)$$

$$W_{bomba} = 12127,37 \text{ N} \cdot 1,791 \frac{\text{m}}{\text{carrera}} = 21720,12 \frac{\text{Nm}}{\text{carrera}}$$

$$\dot{W}_{bomba-bhp} = W_{bomba} \cdot N \quad (9.12)$$

$$\dot{W}_{bomba-bhp} = 21720,12 \frac{\text{Nm}}{\text{carrera}} \cdot 12 \frac{\text{carreras}}{\text{min}} = 260,641 \frac{\text{kNm}}{\text{min}}$$

$$\dot{W}_{bomba-bhp} = 260,641 \frac{\text{kNm}}{\text{min}} \cdot \frac{1 \text{ bhp}}{44,762 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{min}}} = 5,8228 \text{ bhp}$$

Finalizando los cálculos de la eficiencia del sistema de bombeo, obtenemos el siguiente resultado:

$$\eta_{bombeo} = \frac{4,2662 \text{ hp}}{5,8228 \text{ hp}} = 0,73267 = 73,27\% \quad (9.8)$$

9.2.3. Análisis de las pérdidas mecánicas.

Las pérdidas de energía de las máquinas asociadas a la fricción existente entre sus componentes son las conocidas como pérdidas mecánicas. Estas fricciones se producen primordialmente entre el pistón principal y la superficie interior del cilindro principal así como entre los pistones de las bombas y las caras internas de sus cilindros (Figura 188). Otras fuentes minoritarias causantes de fricción pueden ser las cadenas de eslabones y todos los ejes de giro que contiene la máquina, así como demás componentes que entran en contacto entre sí.

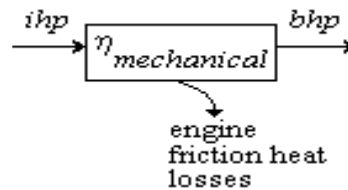


Figura 186: Representación gráfica de la eficiencia mecánica de las máquinas.

La eficiencia mecánica de la máquina se obtiene de la relación entre su potencia indicada ($\dot{W}_{cil-pr-ihp}$) y la potencia de freno entregada por el sistema de bombeo ($\dot{W}_{bomba-bhp}$). Esto queda presentado gráficamente en la Figura 186. La potencia indicada, “*ihp*” dadas sus siglas en inglés “*indicated horse power*”, de una máquina/motor es aquella sin considerar las pérdidas por fricción, y en el caso de las máquinas de vapor de *Newcomen* y de *Watt* es la entregada por el cilindro principal.

$$\eta_{mecánica} = \frac{\dot{W}_{bomba-bhp}}{\dot{W}_{cil-pr-ihp}} \quad (9.17)$$

La potencia indicada se puede calcular como el producto del trabajo realizado por el pistón principal al descender durante la fase de potencia de la máquina (W_{cil-pr}) y la velocidad media de operación de la máquina (N):

$$\dot{W}_{cil-pr-ihp} = W_{cil-pr} \cdot N \quad (9.18)$$

Además, el parámetro W_{cil-pr} de una máquina/motor suele ser calculado como el producto de la presión media efectiva ($\bar{p}_{cilindro}$) y del volumen dentro del cilindro que recorre el pistón (ΔV_{recurr}):

$$W_{cil-pr} = \bar{p}_{cilindro} \cdot \Delta V_{recurr} \quad (9.19)$$

Por lo tanto, se realizan los siguientes cálculos para obtener un valor de la eficiencia mecánica ($\eta_{mecánica}$):

$$W_{cil-pr} = \bar{p}_{cilindro} \cdot \Delta V_{recurr} \quad (9.19)$$

$$W_{cil-pr} = \bar{p}_{cilindro} \cdot \frac{\pi \cdot D_{cil-pr}^2}{4} \cdot L_{carrera} \quad (9.20)$$

$$W_{cil-pr} = 65 \text{ kPa} \cdot \frac{\pi \cdot (0,550 \text{ m})^2}{4} \cdot 1,791 \frac{\text{m}}{\text{carrera}} = 27,6582 \frac{\text{kPa} \cdot \text{m}^3}{\text{carrera}}$$

$$\dot{W}_{cil-pr-ihp} = W_{cil-pr} \cdot N \quad (9.18)$$

$$\dot{W}_{cil-pr-ihp} = 27,6582 \frac{\text{kPa} \cdot \text{m}^3}{\text{carrera}} \cdot 12 \frac{\text{carreras}}{\text{min}} = 331,898 \frac{\text{kPa} \cdot \text{m}^3}{\text{min}}$$

$$\dot{W}_{cil-pr-ihp} = 331,898 \frac{\text{kPa} \cdot \text{m}^3}{\text{min}} \cdot \frac{1 \text{ ihp}}{44,762 \frac{\text{kPa} \cdot \text{m}^3}{\text{min}}} = 7,4147 \text{ ihp}$$

$$\eta_{mecánica} = \frac{5,8228 \text{ hp}}{7,4147 \text{ hp}} = 0,78530 = \mathbf{78,53\%} \quad (9.17)$$

9.2.4. Análisis de la eficiencia global de la máquina.

La eficiencia global de la máquina de vapor es definida como la relación entre la potencia química disponible por el combustible utilizado ($\dot{E}_{carb-vatio}$) y la potencia del agua impulsada por el sistema de bombeo ($\dot{W}_{bomba-mina-vatio}$):

$$\eta_{global} = \frac{\dot{W}_{bomba-vatio}}{\dot{E}_{carb-vatio}} \quad (9.21)$$

Pasando los valores obtenidos para el parámetro $\dot{W}_{bomba-mina-whp}$, de caballos de potencia (hp) a Vatios, y para el parámetro \dot{E}_{carb} , de kilojulios/hora a Vatios, obtenemos:

$$\dot{E}_{carb-vatio} = \dot{E}_{carb} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{h}} \right) \cdot \frac{1000 \text{ J}}{1 \text{ kJ}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \quad (9.22)$$

$$\dot{E}_{carb-vatio} = 8,0981 \cdot 10^6 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \cdot \frac{1000 \text{ J}}{1 \text{ kJ}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 2,2249 \cdot 10^6 \text{ W}$$

$$\dot{W}_{bomba-vatio} = \dot{W}_{bomba-whp}(\text{hp}) \cdot \frac{44762 \frac{\text{Nm}}{\text{min}}}{1 \text{ hp}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \quad (9.23)$$

$$\dot{W}_{bomba-vatio} = 4,2662 \text{ hp} \cdot \frac{44762 \frac{\text{Nm}}{\text{min}}}{1 \text{ hp}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 3182,73 \text{ W}$$

$$\eta_{global} = \frac{3182,73 \text{ W}}{2,2249 \cdot 10^6 \text{ W}} = 0,0014305 = \mathbf{0,1431\%} \quad (9.21)$$

9.2.5. Análisis de la eficiencia térmica del cilindro principal y del condensador.

Para este análisis es importante establecer que las pérdidas térmicas consideradas son, para la máquina *Newcomen*, únicamente las que tienen lugar en el cilindro principal de la máquina (Figura 188), mientras que para la máquina de *Watt* son las que tienen lugar tanto en el cilindro principal como en el condensador (Figura 189 y Figura 190).

Comparando la Figura 188 y la Figura 189 cabe destacar que en el cilindro de la máquina de *Watt* se producen menos pérdidas térmicas en comparación con el de la máquina de *Newcomen*. Esto se debe a que la condensación del vapor, en la máquina de *Watt* se produce en el condensador, en lugar de en el propio cilindro, como sí es el caso para la máquina de *Newcomen*.

Además, las pérdidas térmicas asociadas al calor que se transmite a través de la superficie del cilindro principal en la máquina de *Newcomen* serán mayor que la experimentada a través de la superficie de la camisa térmica en la máquina de *Watt*, ya que, mientras que el cilindro principal estaba hecho de latón, un material con una excelente transmitancia térmica, la camisa térmica estaba hecha de un material con un excelente aislamiento térmico, como por ejemplo la madera de balsa.

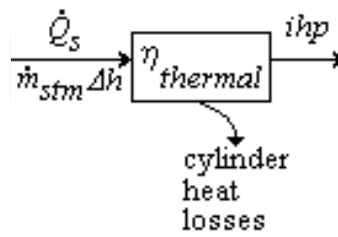


Figura 187: Representación gráfica de la eficiencia mecánica de las máquinas.

En la Figura 187 se puede apreciar que la eficiencia térmica de las máquinas de vapor es la relación entre la potencia calorífica proporcionada por el vapor (\dot{Q}_v) y la potencia indicada de la máquina ($\dot{W}_{cil-pr-ihp}$):

$$\eta_{térmica} = \frac{\dot{W}_{cil-pr-vatio}}{\dot{Q}_{v-vatio}} \quad (9.24)$$

$$\eta_{térmica} = \frac{7,4147 \text{ hp} \cdot \frac{44762 \frac{J}{min}}{1 \text{ hp}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}}{6,1032 \cdot 10^6 \frac{kJ}{hr} \cdot \frac{1000 \text{ J}}{1 \text{ kJ}} \cdot \frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ s}}} = \frac{5531,61 \text{ W}}{1,6953 \cdot 10^6 \text{ W}} = 0,0032629$$

$$\eta_{térmica} = 0,3263\%$$

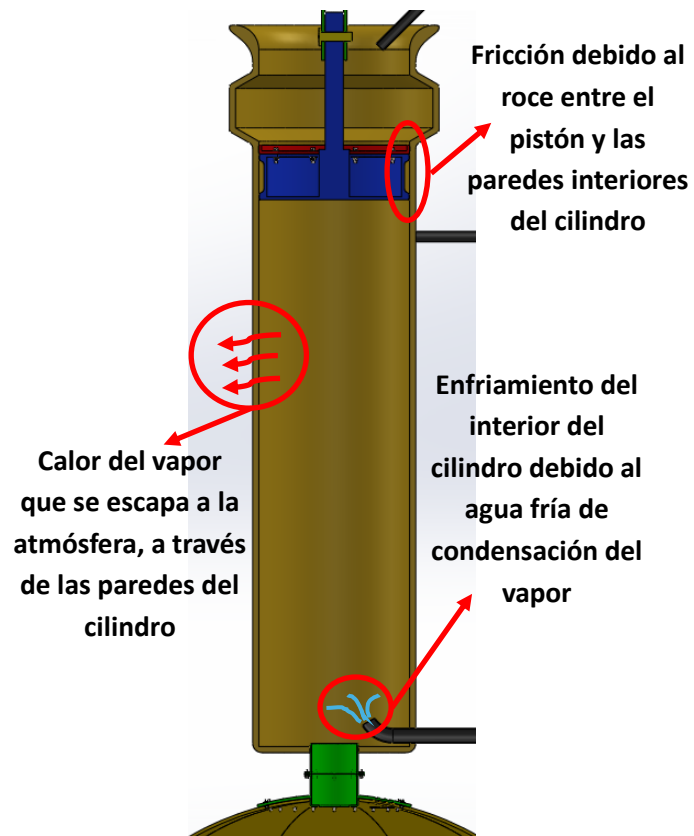


Figura 188: Pérdidas térmicas y mecánicas asociadas al cilindro. Máquina de Newcomen.

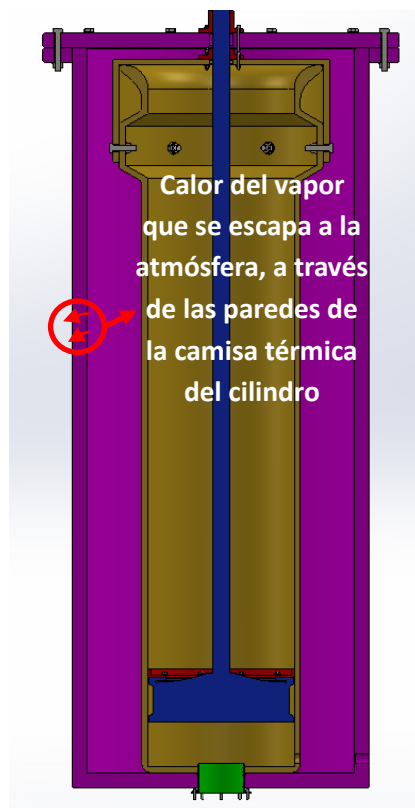


Figura 189: Pérdidas térmicas asociadas al cilindro. Máquina de Watt.

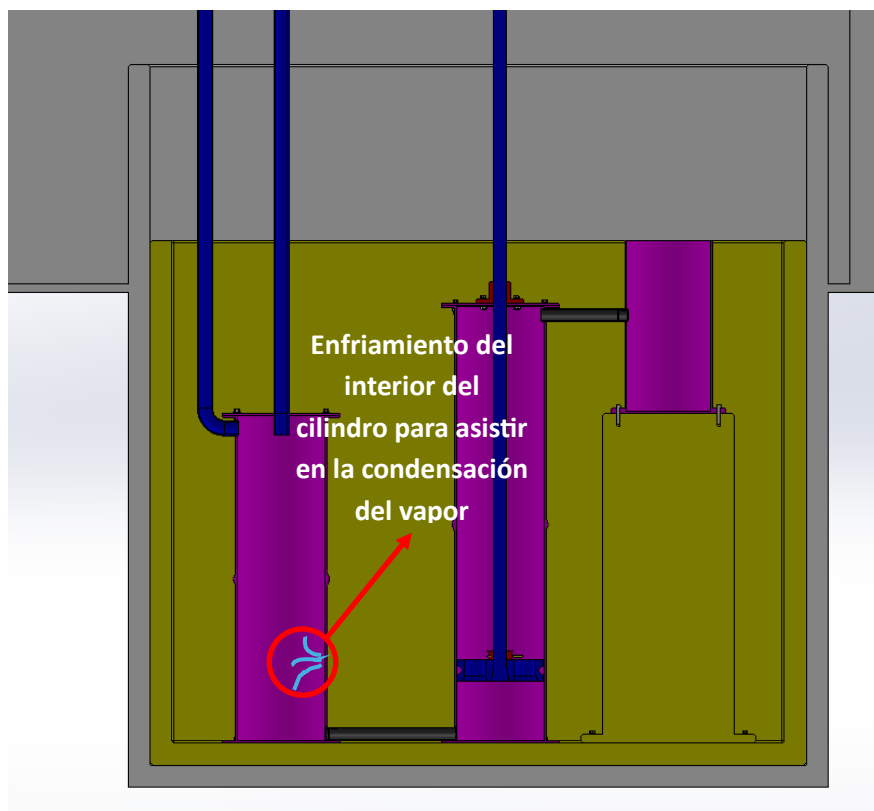


Figura 190: Pérdidas térmicas asociadas al condensador. Máquina de Watt.

9.3. Resumen y evaluación de los resultados del estudio termodinámico de las máquinas de vapor de Newcomen y de Watt.

En la Tabla 12 se resumen los resultados de las distintas eficiencias que se han obtenido en el cálculo realizado en los anteriores subapartados, para la máquina de *Newcomen*, además de los resultados obtenidos mediante el mismo procedimiento de cálculo, para la máquina de *Watt*.

Tabla 12: Resumen de resultados obtenidos para el estudio termodinámico de las máquinas de *Newcomen* y de *Watt*.

Parámetro	Newcomen	Watt	Mejora porcentual
η_{bombeo}	73,3%	84,0%	14,6%
η_{caldera}	75,4%	82,3%	9,15%
η_{global}	0,143%	1,34%	837%
$\eta_{\text{mecánica}}$	78,5%	86,8%	10,6%
$\eta_{\text{térmica}}$	0,326%	2,22%	581%

Atendiendo a estos resultados, se pueden observar los siguientes aspectos:

Primero, que la máquina de *Watt* supera a la máquina de *Newcomen* en todas las eficiencias consideradas en este estudio, consiguiendo que la eficiencia global de la máquina aumentase en un **837%**.

Segundo, cabe destacar que las mejoras energéticas debido al sistema de bombeo, del **14,6%**, a la caldera, del **9,15%**, y a los componentes mecánicos, del **10,6%**, no son atribuidos

exclusivamente a la máquina de *Watt*, ya que desde que se construyó la primera máquina de *Newcomen*, en el año 1712, hasta que *Watt* construyó la suya, en el año 1769, estas mejoras ya se fueron ideando e incorporando poco a poco a las máquinas de *Newcomen*.

Tercero, que el aspecto que claramente lastraba el rendimiento de las máquinas de vapor era su eficiencia térmica, ya que, mientras las eficiencias del sistema de bombeo, de la caldera y de los componentes mecánicos de la máquina de *Newcomen* eran todas superiores al **73%**, la global de la máquina era reducida al **0,143%** por su eficiencia térmica, del **0,326%**.

Por último, que a pesar de que la eficiencia térmica de la máquina de *Watt*, del **2,22%**, siguiese siendo la que lastraba la eficiencia global de la máquina, del **1,34%**, ésta experimentó un aumento sobresaliente, del **581%**, gracias a las modificaciones que *Watt* realizó sobre las máquinas de *Newcomen*:

- Condensar el vapor en un condensador separado del cilindro principal, en vez de realizar la condensación en el mismo cilindro.
- Cerrar el cilindro principal por su parte superior y admitir el vapor en él tanto por su parte superior, durante la fase de potencia, como inferior, durante la fase de carga, en lugar de tenerlo abierto a la atmósfera y que fuese ésta la que presionase sobre el pistón hacia abajo durante la fase de potencia.
- Rodear el cilindro principal con una camisa térmica aislante, con el objetivo de mantener constantemente caliente el interior del cilindro.

10. Conclusiones.

Habiendo completado el Trabajo Final de Máster (TFM) se extrae la conclusión principal de que los modelos digitales de las máquinas de vapor de *Thomas Newcomen* y de *James Watt*, que se han desarrollado como parte del *Proyecto de Innovación Docente (PIE)* impulsado por el *Grupo de Investigación en Ingeniería de Fabricación, TEP933-iFAB*, y que ha sido expuesto en la presente memoria, enriquecerán en gran medida el *Museo Virtual* de la *Escuela de Ingenierías Industriales* de la *UMA* y ofrece a la misma una amplia serie de atractivas oportunidades docentes, como la de comprender la historia y el funcionamiento de dichas máquinas a la vez que se interactúan, de forma digital y en tiempo real, con estas dos máquinas que fueron primordiales para el comienzo y desarrollo de la *Primera Revolución Industrial*.

Además, a continuación, se presentan las conclusiones secundarias extraídas al completar el TFM que ha sido tratado a lo largo de la presente memoria:

1. Se ha investigado la historia de la utilización de la energía del vapor, desde los años de la *Antigua Grecia* hasta los de la *Revolución Industrial* y se ha demostrado que las máquinas de vapor de *Thomas Newcomen* y de *James Watt*, construidas en los años 1712 y 1769 respectivamente, fueron las más trascendentales para el desarrollo de dicho evento histórico.
2. Se ha justificado que la máquina que *Watt* construye en el año 1769 consiste en la misma que *Newcomen* construye en el año 1712, pero incorporando dos nuevos elementos, la camisa térmica del cilindro principal y el condensador junto con una bomba de vacío, para mejorar su rendimiento.
3. Se ha seleccionado el software *CAD, SolidWorks*, para realizar los modelos digitales, debido a que las características del programa se ajustan a las necesidades del proyecto y a la alta familiaridad del autor de dichos modelos con el software.
4. Se ha obtenido un modelo digital de la máquina de *Newcomen* lo más fiel posible con el invento real construido. Luego, mediante superposición sobre este modelo digital de los elementos que *James Watt* añadió sobre la de *Newcomen* para mejorar su rendimiento, se ha obtenido el modelo digital de la máquina de vapor de *Watt*.
5. Se han generado dos versiones de los modelos digitales de las máquinas. La primera, con las apariencias realistas de los materiales a partir de los cuales estaban hechos cada uno de los elementos que componían las máquinas. La segunda, con los colores diferenciadores necesarios para poder realizar el estudio de funcionalidad de forma correcta e intuitiva.
6. Se han obtenido los renderizados realistas de las máquinas modeladas.
7. Todos los modelos digitales obtenidos en *SolidWorks* se han exportado a archivos tipo *STEP*, para que estos puedan ser implementados al *Museo Virtual* de la *EII* de la *UMA* en el futuro.
8. Se ha realizado un estudio exhaustivo del funcionamiento de la máquina de *Newcomen* y de los elementos que *Watt* añade sobre esta (camisa térmica, condensador y bomba de vacío), de forma que cualquier persona que lea la presente memoria pueda comprender el funcionamiento completo de estos inventos y para que parte de esta

información pueda ser incluida en el *Museo Virtual* para una mejor experiencia didáctica por parte de sus usuarios.

9. Se ha expuesto un estudio estructural en el cual se ha utilizado el módulo de simulación del programa SolidWorks para realizar un análisis estático lineal de la cadena, de Acero AISI 1020, que conecta el pistón del cilindro principal de las máquinas de vapor con la viga elevadora. Tras dicho estudio, en el que se simuló el comportamiento de la cadena bajo las fuerzas más desfavorables, consistiendo éstas del propio peso de la cadena, el peso de los componentes que cuelgan de ella y la fuerza resultante del balance de presiones entre el vacío ideal, debajo del pistón, y la atmósfera, encima del pistón, se halló una tensión máxima de 252 MPa y un Factor de Seguridad (FDS) del diseño de 1,40; significando ello que, a pesar de que la cadena no rebasará su límite elástico, no cumple con los estándares actuales de prevención (*NTP 861*), los cuales dictan un FDS mínimo de 4, y que, por lo tanto, de construirse las máquinas modeladas, el diseño de esta cadena se modificará hasta que alcance el mínimo FDS estipulado en dicha *Nota Técnica de Prevención*.
10. Se ha finalizado el proyecto realizando un análisis termodinámico de las dos máquinas, en el cual se ha evaluado que la máquina de *Watt* mejoró la *eficiencia global*, respecto a la de *Newcomen*, en un 837%, del 0,143% al 1,34%. Finalmente, este estudio corrobora, cuantitativamente, que el rendimiento de la máquina de vapor mejoró, especialmente, gracias a la camisa térmica y al condensador, ya que las mejoras energéticas relativas a la caldera, al sistema de bombeo y a los componentes mecánicos fueron de entre el 9,15% y el 14,6%, mientras que la *eficiencia térmica* mejoró en un 581%, del 0,326% al 2,22%.

11. Líneas futuras de trabajo.

Habiendo cumplido con los objetivos de este Trabajo Final de Máster y obtenido las conclusiones recientemente expuestas, el primer paso que se deberá tomar será el de implementar los modelos digitales de las dos máquinas al *Museo Virtual* de la *EII* de la *UMA*, animándolas de forma que estas se muevan conforme a lo expuesto en el estudio de funcionalidad, obteniendo así una experiencia óptima durante la visita a dicho museo.

Además, se proponen las siguientes líneas futuras de trabajo que se podrían comenzar a partir del trabajo realizado y que se ha presentado en esta memoria:

1. Fabricar y poner en marcha una maqueta funcional a escala de las máquinas modeladas, con la posibilidad de sustituir la quema de carbón por otra fuente de energía, por ejemplo, eléctrica.
2. Realizar un estudio dinámico cuantitativo de todas las fuerzas que dan movimiento a la máquina y una homóloga simulación computacional utilizando los modelos digitales obtenidos en este trabajo.
3. Hacer una simulación térmica sobre los modelos realizados de la caldera, el cilindro principal y el condensador.
4. Realizar un estudio fluidodinámico computacional para simular el flujo del vapor y del agua a través del sistema de conducciones de las máquinas modeladas.
5. Obtener una nueva aproximación del estudio termodinámico, utilizando los resultados que se obtengan de estas simulaciones de fuerzas dinámica, térmica y fluidodinámica.
6. Completar el *Museo Virtual* de la *EII* de la *UMA* con los modelos digitales de las demás máquinas de vapor que se han presentado en el Capítulo 3 de la presente memoria, relativo a la historia de las máquinas de vapor, como por ejemplo la máquina de vapor de *Jerónimo de Ayanz y Beaumont*, la de *Thomas Savery* o la máquina de vapor rotativa de *James Watt*.

12. Bibliografía.

- [1] R. H. Thurston, *A History of the Growth of the Steam Engine*, Third. 1883.
- [2] Real Sociedad Española de Física, «P1. El Architrón de Arquímedes», 2023. Accedido: 20 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://rsef.es/images/Fisica/PRUEBAS_OEF2023.pdf
- [3] S. Strandh, *Las Máquinas, Una Historia Ilustrada*. Madrid, 1988.
- [4] E. H. Knight, *Knight's American mechanical dictionary: a description of tools, instruments, machines, processes and engineering, history of inventions, general technological vocabulary; and digest of mechanical appliances in science and the arts*. Boston: Houghton, Mifflin and Company, 1882. Accedido: 20 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://archive.org/details/knightsamericanm02knig>
- [5] Meisterdrucke, «Mecanismo automático diseñado por Herón de Alejandría (el Viejo) (siglo I) para abrir y cerrar las puertas de un templo. Herón, Spiritalia.» Accedido: 20 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.meisterdrucke.es/impresion-art%C3%ADstica/Unknown-artist/985733/Mecanismo-autom%C3%A1tico-dise%C3%B1ado-por-Her%C3%B3n-de-Alejandr%C3%ADa-\(el-Viejo\)-\(siglo-I\)-para-abrir-y-cerrar-las-puertas-de-un-templo.-Her%C3%B3n,-Spiritalia.html](https://www.meisterdrucke.es/impresion-art%C3%ADstica/Unknown-artist/985733/Mecanismo-autom%C3%A1tico-dise%C3%B1ado-por-Her%C3%B3n-de-Alejandr%C3%ADa-(el-Viejo)-(siglo-I)-para-abrir-y-cerrar-las-puertas-de-un-templo.-Her%C3%B3n,-Spiritalia.html)
- [6] L. Sevilla Hurtado, *Aproximación a la revolución tecnológica de la máquina de vapor en explotaciones mineras*. Minería y Metalurgia Históricas en el Sudoeste Europeo: Geología, Minería y Sociedad, 2022.
- [7] L. Da Vinci, «Códex Atlánticus». Accedido: 22 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://codex-atlanticus.ambrosiana.it/>
- [8] Gobierno de España. Ministerio de Cultura. Portal de Archivos Españoles, «Archivo General de Simancas». Accedido: 20 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://pares.mcu.es/ParesBusquedas20/catalogo/show/5360573>
- [9] N. García Tapia, *Some Designs of Jerónimo de Ayanz. Relating to Mining, Metallurgy and Steam Pumps. History of Technology*, vol. 14. New York: Bloomsbury Publishing Inc., 1993.
- [10] E. Somerset, *The Century of Inventions*. 1655. Accedido: 20 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://web.archive.org/web/20081224131401/http://www.history.rochester.edu/steam/dircks/index.html#contents>
- [11] T. Savery, «Steam Apparatus», 356, 25 de julio de 1698 Accedido: 20 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.datamp.org/patents/advance.php?pn=169800356&id=51183&set=11>
- [12] L. Sevilla Hurtado, «La máquina de vapor y sus aplicaciones en los siglos XVIII y XIX. Aspectos Tecnológicos de la Revolución Industrial. Curso Online. Programa Extensión Universitaria UNED.», Ponferrada, abr. 2021.
- [13] L. Sevilla Hurtado, «Orígenes históricos del empleo tecnológico del vapor (1)», *Metalmeccánica*, 15 de junio de 2004. Accedido: 20 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/8329-Origenes-historicos-del-empleo-tecnologico-del-vapor-\(1\).html](https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/8329-Origenes-historicos-del-empleo-tecnologico-del-vapor-(1).html)
- [14] L. Rolt y J. Allen, *The Steam Engine of Thomas Newcomen*. Ashbourne: Landmark Publishing Ltd, 1997.
- [15] J. Watt, «Watt's Method of Lessening the Consumption of Steam & Fuel in Fire Engines», 913, 5 de enero de 1769 Accedido: 20 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/032484358/publication/GB176900913A?q=pn%3DGB176900913>
- [16] J. Watt, «Watt's Improvements in Steam Engines», 1306, 25 de octubre de 1781 Accedido: 20 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://books.google.es/books?id=qurv-HxFS4C&pg=PA8-IA86&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

- [17] D. P. Miller, *The Life and Legend of James Watt*. Pittsburgh: Universidad de Pittsburgh, 2019.
- [18] J. H. Lienhard, «Five Hornblowers», University of Houston. Cullen College of Engineering. The Engines of our Ingenuity. Accedido: 20 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://engines.egr.uh.edu/episode/2015>
- [19] Grace's Guide to British Industrial History, «Arthur Woolf».
- [20] Casa de la Cultura de Nuevo León, «La pieza del mes, Locomotora Trevithick 1804», CONARTE. Accedido: 20 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://conarte.org.mx/exposiciones/la-pieza-del-mes-locomotora-trevithick-1804/>
- [21] M. Á. Cobo y A. I. Rodríguez Lehto, «La historia real del automóvil», *Driving your dream*, 20 de junio de 2017. Accedido: 20 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.drivingyourdream.com/articles/cual-es-el-primer-coche-de-la-historia-en-realidad>
- [22] «SOLIDWORKS». Accedido: 20 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.solidworks.com/>
- [23] D. Calderón Herrera, «La Tecnología del Vapor aplicada en las Minas de Almadén. Desde su Origen hasta el Consejo de Administración.», Universidad de Córdoba, Córdoba, 2017.
- [24] T. Tredgold, *Tratado de las Máquinas de Vapor y de su aplicación a la Navegación, Minas, Manufacturas, etc.* Madrid: D. Leon Amarita, 1831. Accedido: 20 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.google.es/books/edition/Tratado_de_las_m%C3%A1quinas_de_vapor_y_de_s/qRfEKNruXhwC?hl=es&gbpv=0
- [25] «textures.com». Accedido: 20 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.textures.com/>
- [26] «Inflation Calculator», Bank of England. Accedido: 20 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.bankofengland.co.uk/monetary-policy/inflation/inflation-calculator>
- [27] «¿Qué es MatLab?», Reclu IT. Accedido: 20 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://recluit.com/que-es-matlab/>
- [28] G. Newbound, «The Atmospheric Engine at Parkgate», *Transactions of the Newcomen Society*, vol. 15, nº 1, pp. 225-228, 1934.
- [29] J. Bourne, *A Treatise on the Steam-engine in Its Various Applications to Mines, Mills, Steam Navigation, Railways, and Agriculture*, 5.ª ed. Londres: Longman, Green and Roberts, 1861. Accedido: 20 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://books.google.es/books/about/A_Treatise_on_the_Steam_engine_in_Its_Va.html?id=A1VRAAAAYAAJ&redir_esc=y
- [30] A. Matthew y J. Cowart, «Thermodynamic Modeling of a Newcomen Steam Engine», 2012.
- [31] C. J. Renedo, «Tablas Termodinámicas de Vapor», *Universidad de Cantabria*. Accedido: 20 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://personales.unican.es/renedoc/Trasperecias%20WEB/Trasp%20Termo%20y%20MF/00%20GRADOS/Tablas%20Termo.pdf>
- [32] Departamento para la Seguridad Energética y Emisiones Netas Zero del Gobierno de Reino Unido, «The UK was a major coal producer throughout the period of the industrial revolution». Accedido: 20 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://www.decc.gov.uk/en/content/cms/statistics/source/cv/cv.aspx>

ANEXOS.

Anexo I. Biblioteca CAD de la versión del modelo de la máquina de Newcomen con apariencias reales.

- TFM-MV-NW_01-00-00_ASSY-ENSAMBLAJE-GENERAL_V0-ModeloCompletoSinMovimiento
- TFM-MV-NW_01-00-00_ASSY-ENSAMBLAJE-GENERAL_V1-SinEngancheCuerdaPozoCadenaSimplConMov
- | TFM-MV-NW_01-01-00_ASSY-CILINDROPRINCIPAL
- | TFM-MV-NW_01-01-01_PART-Cilindro
- TFM-MV-NW_01-01-02_PART-CilindroTuboVapor
- ♣ TFM-MV-NW_01-01-03_PART-CilindroPistónCuerpo
- TFM-MV-NW_01-01-04_PART-CilindroPistónSelloSuperior
- ↘ TFM-MV-NW_01-01-05_PART-CilindroPistónEnganche
- ↘ TFM-MV-NW_01-01-06_PART-CilindroPistónEnganchePasador
- ↘ TFM-MV-NW_01-01-07_PART-CilindroPistónEnganchePasadorPin
- TFM-MV-NW_01-02-00_ASSY-CALDERA
- TFM-MV-NW_01-02-01_PART-CalderaCilindro
- TFM-MV-NW_01-02-02_PART-CalderaCúpulaPlomo
- TFM-MV-NW_01-02-03_PART-CalderaTapaSuperiorCúpula
- TFM-MV-NW_01-02-04_PART-CalderaEncapsuladoLadrillo
- TFM-MV-NW_01-02-05_PART-CalderaAnilloRejilla
- TFM-MV-NW_01-02-06_PART-CalderaPuertaCombustible
- TFM-MV-NW_01-02-07_PART-CalderaBridaPuerta1
- ↘ TFM-MV-NW_01-02-08_PART-CalderaBridaPuerta2
- ↘ TFM-MV-NW_01-02-09_PART-CalderaPasadorBridaPuerta
- ↘ TFM-MV-NW_01-02-10_PART-CalderaBridaCierrePuerta1
- ♣ TFM-MV-NW_01-02-11_PART-CalderaEngancheCierrePuerta
- ♣ TFM-MV-NW_01-02-12_PART-CalderaBridaTuberíaAguaRelleno
- TFM-MV-NW_01-02-13_PART-CalderaColumnaTopesValvulaVapor
- ↘ TFM-MV-NW_01-02-14_PART-CalderaTablonTopesValvulaVapor
- ↘ TFM-MV-NW_01-02-15_PART-CalderaApoyoEnramadaValvulaVapor

- TFM-MV-NW_01-02-16_PART-CalderaEnramadaValvulaVapor
- TFM-MV-NW_01-02-17_PART-ValvulaVaporPalancaY
- TFM-MV-NW_01-02-18_PART-CalderaTablonTopesValvulaVapor
- TFM-MV-NW_01-02-19_PART-ValvulaVaporPalancaYPeso
- TFM-MV-NW_01-02-20_PART-ValvulaVaporPalancaYPequeña
- TFM-MV-NW_01-02-21_PART-AguaDeLaCaldera
- TFM-MV-NW_01-02-22_PART-ColumnaTopePalancaF
- TFM-MV-NW_01-02-23_PART-ColumnaRetenedor
- TFM-MV-NW_01-02-24_PART-ValvulaDelInyeccionRetenedor
- TFM-MV-NW_01-02-25_PART-ValvulaDelInyeccionRetenedorEje
- TFM-MV-NW_01-02-26_PART-ValvulaDelInyeccionTopePalancaF
- TFM-MV-NW_01-02-27_PART-ValvulaDelInyeccionPlanchaRetenedorLeva
- TFM-MV-NW_01-02-28_PART-ValvulaDelInyeccionRetenedorLeva
- TFM-MV-NW_01-02-29_PART-MedidorNivelDeAguaCaldera
- TFM-MV-NW_01-02-30_PART-MedidorNivelDeAguaCalderaIndicador
- TFM-MV-NW_01-02-31_PART-TuberiaDesagueManualCaldera
- TFM-MV-NW_01-02-32_PART-ManillaValvulaManualDesagueCaldera
- TFM-MV-NW_01-02-33_PART-PasadorValvulaManualDesagueCaldera
- TFM-MV-NW_01-02-34_PART-BolaValvulaManualDesagueCaldera
- TFM-MV-NW_01-02-35_PART-CompuertaValvulaManualDesagueCaldera
- TFM-MV-NW_01-03-00_ASSY-CASA
- TFM-MV-NW_01-03-01_PART-Paredes
- TFM-MV-NW_01-03-02_PART-Techo
- TFM-MV-NW_01-03-03_PART-SueloPlantaSuperior
- TFM-MV-NW_01-03-04_PART-SueloPlantaSotano
- TFM-MV-NW_01-03-05_PART-Vigas
- TFM-MV-NW_01-03-06_PART-EstructuraVigasSuperioresColumnas
- TFM-MV-NW_01-03-07_PART-EstructuraVigasSuperioresVigas
- TFM-MV-NW_01-03-08_PART-BaseApoyoDepósitoSuperior
- TFM-MV-NW_01-03-09_PART-MarcoPuertaCasa
- TFM-MV-NW_01-03-10_PART-BloqueSujeciónEjeRotacionViga
- TFM-MV-NW_01-03-11_PART-BloqueRodamientoEjeViga

- TFM-MV-NW_01-03-12_PART-DepósitoSuperior
- ⌋ TFM-MV-NW_01-03-13_PART-MarcoPuertaHabitationBomba
- TFM-MV-NW_01-03-14_PART-AguaDelDepositoSuperior
- ↘ TFM-MV-NW_01-03-15_PART-VigaParaValvulaDelnyeccion
- TFM-MV-NW_01-03-16_PART-ColumnaParaValvulaDelnyeccion
- ↘ TFM-MV-NW_01-03-17_PART-ValvulaDelnyeccionLeva
- ↘ TFM-MV-NW_01-03-18_PART-ValvulaDelnyeccionLevaEje
- ↘ TFM-MV-NW_01-03-19_PART-ValvulaDelnyeccionCordonLevaPalanca
- ⌋ TFM-MV-NW_01-04-00_ASSY-VIGAELEVADORA
- ↘ TFM-MV-NW_01-04-01_PART-VigaPrincipal
- ↘ TFM-MV-NW_01-04-02_PART-VigaPrincipalArcosExtremos
- ↘ TFM-MV-NW_01-04-03_PART-VigaPrincipalDiagonalesLargas
- ↘ TFM-MV-NW_01-04-04_PART-VigaPrincipalDiagonalesCortas
- ↘ TFM-MV-NW_01-04-05_PART-VigaPrincipalDiagonalesMediaEngancheCadenas
- ↘ TFM-MV-NW_01-04-06_PART-VigaPrincipalPasadorEngancheCadenas
- TFM-MV-NW_01-04-07_PART-VigaPrincipalChapaEje
- ↘ TFM-MV-NW_01-04-08_PART-VigaPrincipalChapaEjePasador
- ↘ TFM-MV-NW_01-04-09_PART-VigaPrincipalArcoIntermedio
- ↘ TFM-MV-NW_01-04-10_PART-PasadorArcoIntermedio
- ⌋ TFM-MV-NW_01-05-00_ASSY-BOMBEOINTERIORCASA
- ↘ TFM-MV-NW_01-05-01_PART-Vastago
- ↘ TFM-MV-NW_01-05-02_PART-VastagoBomba
- ⌋ TFM-MV-NW_01-05-03_PART-BombaCilindro
- TFM-MV-NW_01-05-04_PART-BombaCilindroTapadera
- ↓ TFM-MV-NW_01-05-05_PART-BombaPiston
- TFM-MV-NW_01-05-06_PART-BombaPistonSelloCuero
- ↘ TFM-MV-NW_01-05-07_PART-BombaPasadorVastago
- ↘ TFM-MV-NW_01-05-08_PART-BombaPasadorVastagoValvulaDelnyeccion
- TFM-MV-NW_01-05-09_PART-BombaValvulaInferior
- TFM-MV-NW_01-05-10_PART-BombaValvulaInferiorTope
- ↘ TFM-MV-NW_01-05-11_PART-PasadorVigaVerticalParaCadena

- TFM-MV-NW_01-06-00_ASSY-VALVULADEVAPOR
- TFM-MV-NW_01-06-01_PART-ValvulaVaporCompuerta
- TFM-MV-NW_01-06-02_PART-ValvulaVaporBasePalancaCompuerta
- TFM-MV-NW_01-06-03_PART-ValvulaVaporTapaBasePalancaCompuerta
- TFM-MV-NW_01-06-04_PART-ValvulaVaporPasadorBasePalancaCompuerta
- TFM-MV-NW_01-06-05_PART-ValvulaVaporPalancaCompuerta
- TFM-MV-NW_01-06-06_PART-ValvulaVaporLinkHorizontal
- TFM-MV-NW_01-06-07_PART-ValvulaVaporPasadorLinkHorizontalPalanca
- TFM-MV-NW_01-06-08_PART-ValvulaVaporEstribo
- TFM-MV-NW_01-06-09_PART-ValvulaVaporGanchosEstribo
- TFM-MV-NW_01-07-00_ASSY-VALVULADEINYECCION
- TFM-MV-NW_01-07-01_PART-ValvulaInyeccionCilindroBoya
- TFM-MV-NW_01-07-02_PART-ValvulaInyeccionBoya
- TFM-MV-NW_01-07-03_PART-ValvulaInyeccionPasadorBoyaLeva
- TFM-MV-NW_01-08-00_ASSY-SISTEMATUBERIAMAESTRAYRAMAS
- TFM-MV-NW_01-08-01_PART-TuberiaMaestra
- TFM-MV-NW_01-08-02_PART-TuberiaRamalInyeccionAgua
- TFM-MV-NW_01-08-03_PART-TuberiaRamaAguaSelladoPiston
- TFM-MV-NW_01-08-04_PART-ValvulaDelInyeccionTapaValvula
- TFM-MV-NW_01-08-05_PART-ValvulaDelInyeccionBolaValvula
- TFM-MV-NW_01-08-06_PART-ValvulaDelInyeccionEjeGiratorioValvula
- TFM-MV-NW_01-08-07_PART-ValvulaDelInyeccionPalanca
- TFM-MV-NW_01-08-08_PART-ValvulaTuberiaMaestraBomba
- TFM-MV-NW_01-08-09_PART-ValvulaTuberiaMaestraBombaPasador
- TFM-MV-NW_01-08-10_PART-ValvulaTuberiaMaestraBombaBridaTope
- TFM-MV-NW_01-08-11_PART-ValvulaTuberiaMaestraBombaEscotilla
- TFM-MV-NW_01-09-00_ASSY-TUBERIADESAGUEDEPOSITOSUPERIOR
- TFM-MV-NW_01-09-01_PART-TuberiaDesagueDepositoSuperior
- TFM-MV-NW_01-10-00_ASSY-TUBERIARECIRCULACIONSELLOAGUAPISTONACALDERA
- TFM-MV-NW_01-10-01_PART-TuberiaAguaSobranteSelloAguaPistonACaldera
- TFM-MV-NW_01-11-00_ASSY-TUBERIADESAGUEDELCILINDRO
- TFM-MV-NW_01-11-01_PART-TuberiaDesagueCilindro

- TFM-MV-NW_01-11-02_PART-ValvulaTuberiaDesagueCilindroBase
- TFM-MV-NW_01-11-03_PART-ValvulaTuberiaDesagueCilindroPasador
- TFM-MV-NW_01-11-04_PART-ValvulaTuberiaDesagueCilindroBridaTope
- TFM-MV-NW_01-11-05_PART-ValvulaTuberiaDesagueCilindroEscotilla
- TFM-MV-NW_01-12-00_ASSY-EXTERIOREDIFICIO_V0-ConEngancheCuerdaPozo
- TFM-MV-NW_01-12-00_ASSY-EXTERIOREDIFICIO_V1-SinEngancheCuerdaPozo
- TFM-MV-NW_01-12-01_PART-SueloExteriorEdificio
- ⌘ TFM-MV-NW_01-12-02_PART-EstructuraSuperficieMina
- ✂ TFM-MV-NW_01-12-03_PART-TablonesBaseParaEstructura
- ⋮ TFM-MV-NW_01-12-04_PART-BombeoLadoMina
- TFM-MV-NW_01-12-05_PART-CuboAguaInteriorMina
- TFM-MV-NW_01-12-06_PART-CuboAguaInteriorMinaAgua
- ⋮ TFM-MV-NW_01-12-07_PART-TuberíaEntreCubosDeAgua
- ⋮ TFM-MV-NW_01-12-08_PART-TuberíaEntreCuboDeAguaYPozo
- ⋮ TFM-MV-NW_01-12-09_PART-TuberíaPozo
- ↓ TFM-MV-NW_01-12-10_PART-BombaPistonInteriorMina
- | TFM-MV-NW_01-12-11_PART-BombaCilindroInteriorMina
- TFM-MV-NW_01-12-12_PART-CuboAguaInteriorMina
- TFM-MV-NW_01-12-13_PART-CuboAguaInteriorMinaTuberíaAccesoCilindroBomba
- TFM-MV-NW_01-12-14_PART-ValvulaTuberia
- TFM-MV-NW_01-12-15_PART-ValvulaTuberiaEscotilla
- TFM-MV-NW_01-12-16_PART-ValvulaTuberiaPasador
- TFM-MV-NW_01-12-17_PART-ValvulaTuberiaBridaTope
- ⋮ TFM-MV-NW_01-12-18_PART-TuberíaExpulsionAguaCilindro
- ⋮ TFM-MV-NW_01-12-19_PART-PasadorParaTamborGiratorio
- TFM-MV-NW_01-12-20_PART-TamborGiratorio
- ⌘ TFM-MV-NW_01-12-21_PART-EstructuraParaTamborGiratorio
- ✂ TFM-MV-NW_01-12-22_PART-TamborGiratorioGrande
- ✂ TFM-MV-NW_01-12-23_PART-PasadorIzquierdoTamborGiratorioGrande
- ✂ TFM-MV-NW_01-12-24_PART-PasadorDerechoTamborGiratorioGrande
- TFM-MV-NW_01-12-25_PART-PalancaTamborGiratorioGrande
- TFM-MV-NW_01-12-26_PART-MangoTamborGiratorioGrande

- TFM-MV-NW_01-12-27_PART-TopoMangoTamborGiratorioGrande
- ♣ TFM-MV-NW_01-12-28_PART-CuerdaTamborGiratorio
- ⋮ TFM-MV-NW_01-12-29_PART-FinalCuerdaTamborGiratorio
- ♣ TFM-MV-NW_01-12-30_PART-ArgollaCuerdaMina
- ⋮ TFM-MV-NW_01-13-00_ASSY-CADENALADOINTERIOR_V0-CadenaEnDetalle
 - | TFM-MV-NW_01-13-00_ASSY-CADENALADOINTERIOR_V1-CadenaSimplificada
- ♣ TFM-MV-NW_01-13-01_PART-EslabonCadena_V0-CadenaEnDetalle
 - | TFM-MV-NW_01-13-01_PART-EslabonCadena_V1-CadenaSimplificada
- ⊙ TFM-MV-NW_01-13-02_PART-EslabonCircularCadena_V0-CadenaEnDetalle
 - | TFM-MV-NW_01-14-00_ASSY-CADENALADOEXTERIOR_V0-CadenaEnDetalle
 - | TFM-MV-NW_01-14-00_ASSY-CADENALADOEXTERIOR_V1-CadenaSimplificada
- ♣ TFM-MV-NW_01-14-01_PART-EslabonCadena_V0-CadenaEnDetalle
 - | TFM-MV-NW_01-14-01_PART-EslabonCadena_V1-CadenaSimplificada
- ⋮ TFM-MV-NW_01-15-00_ASSY-CADENAINFERIORARCOINTERMEDIO_V0-CadenaEnDetalle
 - ⋮ TFM-MV-NW_01-15-00_ASSY-CADENAINFERIORARCOINTERMEDIO_V1-CadenaSimplificada
- ♣ TFM-MV-NW_01-15-01_PART-EslabonCadenaIntermedia_V0-CadenaEnDetalle
 - ⋮ TFM-MV-NW_01-15-01_PART-EslabonCadenaIntermedia_V1-CadenaSimplificada
- ⊙ TFM-MV-NW_01-15-02_PART-EslabonCircularCadenaIntermedia_V0-CadenaEnDetalle
- ⊙ TFM-MV-NW_01-15-03_PART-EslabonCircularCadenaIntermedia_V0-CadenaEnDetalle
 - ⋮ TFM-MV-NW_01-16-00_ASSY-CADENASUPERIORARCOINTERMEDIO_V0-CadenaEnDetalle
 - ⋮ TFM-MV-NW_01-16-00_ASSY-CADENASUPERIORARCOINTERMEDIO_V1-CadenaSimplificada
- ♣ TFM-MV-NW_01-16-01_PART-EslabonCadenaIntermedia_V0-CadenaEnDetalle
 - ⋮ TFM-MV-NW_01-16-01_PART-EslabonCadenaIntermedia_V1-CadenaSimplificada
- ⊙ TFM-MV-NW_01-16-02_PART-EslabonCircularCadenaIntermedia_V0-CadenaEnDetalle
- ⊙ TFM-MV-NW_01-16-03_PART-EslabonCircularCadenaIntermedia_V0-CadenaEnDetalle

Anexo II. Biblioteca CAD de la versión del modelo de la máquina de Newcomen con colores llamativos para la demostración funcional.

- TFM-MV-NW_02-00-00_ASSY-ENSAMBLAJE-GENERAL_V0-ModeloCompletoSinMovimiento
- TFM-MV-NW_02-00-00_ASSY-ENSAMBLAJE-GENERAL_V1-SinEngancheCuerdaPozoCadenaSimplConMov
- TFM-MV-NW_02-01-00_ASSY-CILINDROPRINCIPAL
- TFM-MV-NW_02-01-01_PART-Cilindro
- TFM-MV-NW_02-01-02_PART-CilindroTuboVapor
- TFM-MV-NW_02-01-03_PART-CilindroPistónCuerpo
- TFM-MV-NW_02-01-04_PART-CilindroPistónSelloSuperior
- TFM-MV-NW_02-01-05_PART-CilindroPistónEnganche
- TFM-MV-NW_02-01-06_PART-CilindroPistónEnganchePasador
- TFM-MV-NW_02-01-07_PART-CilindroPistónEnganchePasadorPin
- TFM-MV-NW_02-02-00_ASSY-CALDERA
- TFM-MV-NW_02-02-01_PART-CalderaCilindro
- TFM-MV-NW_02-02-02_PART-CalderaCúpulaPlomo
- TFM-MV-NW_02-02-03_PART-CalderaTapaSuperiorCúpula
- TFM-MV-NW_02-02-04_PART-CalderaEncapsuladoLadrillo
- TFM-MV-NW_02-02-05_PART-CalderaAnilloRejilla
- TFM-MV-NW_02-02-06_PART-CalderaPuertaCombustible
- TFM-MV-NW_02-02-07_PART-CalderaBridaPuerta1
- TFM-MV-NW_02-02-08_PART-CalderaBridaPuerta2
- TFM-MV-NW_02-02-09_PART-CalderaPasadorBridaPuerta
- TFM-MV-NW_02-02-10_PART-CalderaBridaCierrePuerta1
- TFM-MV-NW_02-02-11_PART-CalderaEngancheCierrePuerta
- TFM-MV-NW_02-02-12_PART-CalderaBridaTuberíaAguaRelleno
- TFM-MV-NW_02-02-13_PART-CalderaColumnaTopesValvulaVapor
- TFM-MV-NW_02-02-14_PART-CalderaTablonTopesValvulaVapor
- TFM-MV-NW_02-02-15_PART-CalderaApoyoEnramadaValvulaVapor
- TFM-MV-NW_02-02-16_PART-CalderaEnramadaValvulaVapor
- TFM-MV-NW_02-02-17_PART-ValvulaVaporPalancaY
- TFM-MV-NW_02-02-18_PART-CalderaTablonTopesValvulaVapor

- TFM-MV-NW_02-02-19_PART-ValvulaVaporPalancaYPeso
- TFM-MV-NW_02-02-20_PART-ValvulaVaporPalancaYPequeña
- TFM-MV-NW_02-02-21_PART-AguaDeLaCaldera
- TFM-MV-NW_02-02-22_PART-ColumnaTopePalancaF
- TFM-MV-NW_02-02-23_PART-ColumnaRetenedor
- TFM-MV-NW_02-02-24_PART-ValvulaDelInyeccionRetenedor
- TFM-MV-NW_02-02-25_PART-ValvulaDelInyeccionRetenedorEje
- TFM-MV-NW_02-02-26_PART-ValvulaDelInyeccionTopePalancaF
- TFM-MV-NW_02-02-27_PART-ValvulaDelInyeccionPlanchaRetenedorLeva
- TFM-MV-NW_02-02-28_PART-ValvulaDelInyeccionRetenedorLeva
- TFM-MV-NW_02-02-29_PART-MedidorNivelDeAguaCaldera
- TFM-MV-NW_02-02-30_PART-MedidorNivelDeAguaCalderaIndicador
- TFM-MV-NW_02-02-31_PART-TuberiaDesagueManualCaldera
- TFM-MV-NW_02-02-32_PART-ManillaValvulaManualDesagueCaldera
- TFM-MV-NW_02-02-33_PART-PasadorValvulaManualDesagueCaldera
- TFM-MV-NW_02-02-34_PART-BolaValvulaManualDesagueCaldera
- TFM-MV-NW_02-02-35_PART-CompuertaValvulaManualDesagueCaldera
- TFM-MV-NW_02-03-00_ASSY-CASA
- TFM-MV-NW_02-03-01_PART-Paredes
- TFM-MV-NW_02-03-02_PART-Techo
- TFM-MV-NW_02-03-03_PART-SueloPlantaSuperior
- TFM-MV-NW_02-03-04_PART-SueloPlantaSotano
- TFM-MV-NW_02-03-05_PART-Vigas
- TFM-MV-NW_02-03-06_PART-EstructuraVigasSuperioresColumnas
- TFM-MV-NW_02-03-07_PART-EstructuraVigasSuperioresVigas
- TFM-MV-NW_02-03-08_PART-BaseApoyoDepósitoSuperior
- TFM-MV-NW_02-03-09_PART-MarcoPuertaCasa
- TFM-MV-NW_02-03-10_PART-BloqueSujeciónEjeRotacionViga
- TFM-MV-NW_02-03-11_PART-BloqueRodamientoEjeViga
- TFM-MV-NW_02-03-12_PART-DepósitoSuperior
- TFM-MV-NW_02-03-13_PART-MarcoPuertaHabitacionBomba
- TFM-MV-NW_02-03-14_PART-AguaDelDepositoSuperior

- TFM-MV-NW_02-03-15_PART-VigaParaValvulaDelInyeccion
- TFM-MV-NW_02-03-16_PART-ColumnaParaValvulaDelInyeccion
- TFM-MV-NW_02-03-17_PART-ValvulaDelInyeccionLeva
- TFM-MV-NW_02-03-18_PART-ValvulaDelInyeccionLevaEje
- TFM-MV-NW_02-03-19_PART-ValvulaDelInyeccionCordonLevaPalanca
- TFM-MV-NW_02-04-00_ASSY-VIGAELEVADORA
- TFM-MV-NW_02-04-01_PART-VigaPrincipal
- TFM-MV-NW_02-04-02_PART-VigaPrincipalArcosExtremos
- TFM-MV-NW_02-04-03_PART-VigaPrincipalDiagonalesLargas
- TFM-MV-NW_02-04-04_PART-VigaPrincipalDiagonalesCortas
- TFM-MV-NW_02-04-05_PART-VigaPrincipalDiagonalesMediaEngancheCadenas
- TFM-MV-NW_02-04-06_PART-VigaPrincipalPasadorEngancheCadenas
- TFM-MV-NW_02-04-07_PART-VigaPrincipalChapaEje
- TFM-MV-NW_02-04-08_PART-VigaPrincipalChapaEjePasador
- TFM-MV-NW_02-04-09_PART-VigaPrincipalArcoIntermedio
- TFM-MV-NW_02-04-10_PART-PasadorArcoIntermedio
- TFM-MV-NW_02-05-00_ASSY-BOMBEOINTERIORCASA
- TFM-MV-NW_02-05-01_PART-Vastago
- TFM-MV-NW_02-05-02_PART-VastagoBomba
- TFM-MV-NW_02-05-03_PART-BombaCilindro
- TFM-MV-NW_02-05-04_PART-BombaCilindroTapadera
- TFM-MV-NW_02-05-05_PART-BombaPiston
- TFM-MV-NW_02-05-06_PART-BombaPistonSelloCuero
- TFM-MV-NW_02-05-07_PART-BombaPasadorVastago
- TFM-MV-NW_02-05-08_PART-BombaPasadorVastagoValvulaDelInyeccion
- TFM-MV-NW_02-05-09_PART-BombaValvulaInferior
- TFM-MV-NW_02-05-10_PART-BombaValvulaInferiorTope
- TFM-MV-NW_02-05-11_PART-PasadorVigaVerticalParaCadena
- TFM-MV-NW_02-06-00_ASSY-VALVULADEVAPOR
- TFM-MV-NW_02-06-01_PART-ValvulaVaporCompuerta
- TFM-MV-NW_02-06-02_PART-ValvulaVaporBasePalancaCompuerta
- TFM-MV-NW_02-06-03_PART-ValvulaVaporTapaBasePalancaCompuerta
- TFM-MV-NW_02-06-04_PART-ValvulaVaporPasadorBasePalancaCompuerta
- TFM-MV-NW_02-06-05_PART-ValvulaVaporPalancaCompuerta
- TFM-MV-NW_02-06-06_PART-ValvulaVaporLinkHorizontal

- TFM-MV-NW_02-06-07_PART-ValvulaVaporPasadorLinkHorizontalPalanca
- TFM-MV-NW_02-06-08_PART-ValvulaVaporEstribo
- TFM-MV-NW_02-06-09_PART-ValvulaVaporGanchosEstribo
- TFM-MV-NW_02-07-00_ASSY-VALVULADEINYECCION
- TFM-MV-NW_02-07-01_PART-ValvulaInyeccionCilindroBoya
- TFM-MV-NW_02-07-02_PART-ValvulaInyeccionBoya
- TFM-MV-NW_02-07-03_PART-ValvulaInyeccionPasadorBoyaLeva
- TFM-MV-NW_02-08-00_ASSY-SISTEMATUBERIAMAESTRAYRAMAS
- TFM-MV-NW_02-08-01_PART-TuberiaMaestra
- TFM-MV-NW_02-08-02_PART-TuberiaRamalInyeccionAgua
- TFM-MV-NW_02-08-03_PART-TuberiaRamaAguaSelladoPiston
- TFM-MV-NW_02-08-04_PART-ValvulaDelInyeccionTapaValvula
- TFM-MV-NW_02-08-05_PART-ValvulaDelInyeccionBolaValvula
- TFM-MV-NW_02-08-06_PART-ValvulaDelInyeccionEjeGiratorioValvula
- TFM-MV-NW_02-08-07_PART-ValvulaDelInyeccionPalanca
- TFM-MV-NW_02-08-08_PART-ValvulaTuberiaMaestraBomba
- TFM-MV-NW_02-08-09_PART-ValvulaTuberiaMaestraBombaPasador
- TFM-MV-NW_02-08-10_PART-ValvulaTuberiaMaestraBombaBridaTope
- TFM-MV-NW_02-08-11_PART-ValvulaTuberiaMaestraBombaEscotilla
- TFM-MV-NW_02-09-00_ASSY-TUBERIADESAGUEDEPOSITOSUPERIOR
- TFM-MV-NW_02-09-01_PART-TuberiaDesagueDepositoSuperior
- TFM-MV-NW_02-10-00_ASSY-TUBERIARECIRCULACIONSELLOAGUAPISTONACALDERA
- TFM-MV-NW_02-10-01_PART-TuberiaAguaSobranteSelloAguaPistonACaldera
- TFM-MV-NW_02-11-00_ASSY-TUBERIADESAGUEDELCILINDRO
- TFM-MV-NW_02-11-01_PART-TuberiaDesagueCilindro
- TFM-MV-NW_02-11-02_PART-ValvulaTuberiaDesagueCilindroBase
- TFM-MV-NW_02-11-03_PART-ValvulaTuberiaDesagueCilindroPasador
- TFM-MV-NW_02-11-04_PART-ValvulaTuberiaDesagueCilindroBridaTope
- TFM-MV-NW_02-11-05_PART-ValvulaTuberiaDesagueCilindroEscotilla
- TFM-MV-NW_02-12-00_ASSY-EXTERIOREDIFICIO_V0-ConEngancheCuerdaPozo
- TFM-MV-NW_02-12-00_ASSY-EXTERIOREDIFICIO_V1-SinEngancheCuerdaPozo
- TFM-MV-NW_02-12-01_PART-SueloExteriorEdificio

- TFM-MV-NW_02-12-02_PART-EstructuraSuperficieMina
- TFM-MV-NW_02-12-03_PART-TablonesBaseParaEstructura
- TFM-MV-NW_02-12-04_PART-BombeoLadoMina
- TFM-MV-NW_02-12-05_PART-CuboAguaInteriorMina
- TFM-MV-NW_02-12-06_PART-CuboAguaInteriorMinaAgua
- TFM-MV-NW_02-12-07_PART-TuberíaEntreCubosDeAgua
- TFM-MV-NW_02-12-08_PART-TuberíaEntreCuboDeAguaYPozo
- TFM-MV-NW_02-12-09_PART-TuberíaPozo
- TFM-MV-NW_02-12-10_PART-BombaPistonInteriorMina
- TFM-MV-NW_02-12-11_PART-BombaCilindroInteriorMina
- TFM-MV-NW_02-12-12_PART-CuboAguaInteriorMina
- TFM-MV-NW_02-12-13_PART-CuboAguaInteriorMinaTuberíaAccesoCilindroBomba
- TFM-MV-NW_02-12-14_PART-ValvulaTuberia
- TFM-MV-NW_02-12-15_PART-ValvulaTuberiaEscotilla
- TFM-MV-NW_02-12-16_PART-ValvulaTuberiaPasador
- TFM-MV-NW_02-12-17_PART-ValvulaTuberiaBridaTope
- TFM-MV-NW_02-12-18_PART-TuberíaExpulsionAguaCilindro
- TFM-MV-NW_02-12-19_PART-PasadorParaTamborGiratorio
- TFM-MV-NW_02-12-20_PART-TamborGiratorio
- TFM-MV-NW_02-12-21_PART-EstructuraParaTamborGiratorio
- TFM-MV-NW_02-12-22_PART-TamborGiratorioGrande
- TFM-MV-NW_02-12-23_PART-PasadorIzquierdoTamborGiratorioGrande
- TFM-MV-NW_02-12-24_PART-PasadorDerechoTamborGiratorioGrande
- TFM-MV-NW_02-12-25_PART-PalancaTamborGiratorioGrande
- TFM-MV-NW_02-12-26_PART-MangoTamborGiratorioGrande
- TFM-MV-NW_02-12-27_PART-TopeMangoTamborGiratorioGrande
- TFM-MV-NW_02-12-28_PART-CuerdaTamborGiratorio
- TFM-MV-NW_02-12-29_PART-FinalCuerdaTamborGiratorio
- TFM-MV-NW_02-12-30_PART-ArgollaCuerdaMina
- TFM-MV-NW_02-13-00_ASSY-CADENALADOINTERIOR_V0-CadenaEnDetalle
- TFM-MV-NW_02-13-00_ASSY-CADENALADOINTERIOR_V1-CadenaSimplificada
- TFM-MV-NW_02-13-01_PART-EslabonCadena_V0-CadenaEnDetalle

- | TFM-MV-NW_02-13-01_PART-EslabonCadena_V1-CadenaSimplificada
- ⦿ TFM-MV-NW_02-13-02_PART-EslabonCircularCadena_V0-CadenaEnDetalle
- | TFM-MV-NW_02-14-00_ASSY-CADENALADOEXTERIOR_V0-CadenaEnDetalle
- | TFM-MV-NW_02-14-00_ASSY-CADENALADOEXTERIOR_V1-CadenaSimplificada
- ⦿ TFM-MV-NW_02-14-01_PART-EslabonCadena_V0-CadenaEnDetalle
- | TFM-MV-NW_02-14-01_PART-EslabonCadena_V1-CadenaSimplificada
- | TFM-MV-NW_02-15-00_ASSY-CADENAINFERIORARCOINTERMEDIO_V0-CadenaEnDetalle
- | TFM-MV-NW_02-15-00_ASSY-CADENAINFERIORARCOINTERMEDIO_V1-CadenaSimplificada
- ⦿ TFM-MV-NW_02-15-01_PART-EslabonCadenaIntermedia_V0-CadenaEnDetalle
- | TFM-MV-NW_02-15-01_PART-EslabonCadenaIntermedia_V1-CadenaSimplificada
- ⦿ TFM-MV-NW_02-15-02_PART-EslabonCircularCadenaIntermedia_V0-CadenaEnDetalle
- ⦿ TFM-MV-NW_02-15-03_PART-EslabonCircularCadenaIntermedia_V0-CadenaEnDetalle
- | TFM-MV-NW_02-16-00_ASSY-CADENASUPERIORARCOINTERMEDIO_V0-CadenaEnDetalle
- | TFM-MV-NW_02-16-00_ASSY-CADENASUPERIORARCOINTERMEDIO_V1-CadenaSimplificada
- ⦿ TFM-MV-NW_02-16-01_PART-EslabonCadenaIntermedia_V0-CadenaEnDetalle
- | TFM-MV-NW_02-16-01_PART-EslabonCadenaIntermedia_V1-CadenaSimplificada
- ⦿ TFM-MV-NW_02-16-02_PART-EslabonCircularCadenaIntermedia_V0-CadenaEnDetalle
- ⦿ TFM-MV-NW_02-16-03_PART-EslabonCircularCadenaIntermedia_V0-CadenaEnDetalle

Anexo III. Biblioteca CAD de la versión del modelo de la máquina de Watt con apariencias reales.

- TFM-MV-WT_01-00-00_ASSY-ENSAMBLAJE-GENERAL_V0-ModeloCompletoSinMovimiento
- TFM-MV-WT_01-00-00_ASSY-ENSAMBLAJE-GENERAL_V1-SinEngancheCuerdaPozoCadenaSimplConMov
- | TFM-MV-WT_01-01-00_ASSY-CILINDROPRINCIPAL
- | TFM-MV-WT_01-01-01_PART-Cilindro
- TFM-MV-WT_01-01-02_PART-CilindroTuboVapor
- | TFM-MV-WT_01-01-03_PART-CilindroPistónCuerpo
- TFM-MV-WT_01-01-04_PART-CilindroPistónSelloSuperior
- ↘ TFM-MV-WT_01-01-05_PART-CilindroPistónEnganche
- ↗ TFM-MV-WT_01-01-06_PART-CilindroPistónEnganchePasador
- ↘ TFM-MV-WT_01-01-07_PART-CilindroPistónEnganchePasadorPin
- TFM-MV-WT_01-01-08_PART-CilindroTapaderaCierrePrimero
- TFM-MV-WT_01-01-09_PART-CilindroSelloTapaderaCierrePrimero
- | TFM-MV-WT_01-01-10_PART-CilindroCamisaTermica
- TFM-MV-WT_01-01-11_PART-CilindroBridaCamisaTermica
- TFM-MV-WT_01-01-12_PART-CilindroCamisaTermicaTapadera
- TFM-MV-WT_01-01-13_PART-CilindroSelloTapaderaCierreSegundo
- | TFM-MV-WT_01-01-14_PART-CilindroConexionCalderaCamisaTermica
- TFM-MV-WT_01-02-00_ASSY-CALDERA
- TFM-MV-WT_01-02-01_PART-CalderaCilindro
- TFM-MV-WT_01-02-02_PART-CalderaCúpulaPlomo
- TFM-MV-WT_01-02-03_PART-CalderaTapaSuperiorCúpula
- TFM-MV-WT_01-02-04_PART-CalderaEncapsuladoLadrillo
- TFM-MV-WT_01-02-05_PART-CalderaAnilloRejilla
- TFM-MV-WT_01-02-06_PART-CalderaPuertaCombustible
- TFM-MV-WT_01-02-07_PART-CalderaBridaPuerta1
- ↘ TFM-MV-WT_01-02-08_PART-CalderaBridaPuerta2
- ↘ TFM-MV-WT_01-02-09_PART-CalderaPasadorBridaPuerta
- ↘ TFM-MV-WT_01-02-10_PART-CalderaBridaCierrePuerta1
- TFM-MV-WT_01-02-11_PART-CalderaEngancheCierrePuerta
- TFM-MV-WT_01-02-12_PART-CalderaBridaTuberíaAguaRelleno

- TFM-MV-WT_01-02-13_PART-CalderaColumnaTopesValvulaVapor
- TFM-MV-WT_01-02-14_PART-CalderaTablonTopesValvulaVapor
- TFM-MV-WT_01-02-15_PART-CalderaApoyoEnramadaValvulaVapor
- TFM-MV-WT_01-02-16_PART-CalderaEnramadaValvulaVapor
- TFM-MV-WT_01-02-17_PART-ValvulaVaporPalancaY
- TFM-MV-WT_01-02-18_PART-CalderaTablonTopesValvulaVapor
- TFM-MV-WT_01-02-19_PART-ValvulaVaporPalancaYPeso
- TFM-MV-WT_01-02-20_PART-ValvulaVaporPalancaYPequeña
- TFM-MV-WT_01-02-21_PART-AguaDeLaCaldera
- TFM-MV-WT_01-02-22_PART-MedidorNivelDeAguaCaldera
- TFM-MV-WT_01-02-23_PART-MedidorNivelDeAguaCalderaIndicador
- TFM-MV-WT_01-02-24_PART-TuberiaDesagueManualCaldera
- TFM-MV-WT_01-02-25_PART-ManillaValvulaManualDesagueCaldera
- TFM-MV-WT_01-02-26_PART-PasadorValvulaManualDesagueCaldera
- TFM-MV-WT_01-02-27_PART-BolaValvulaManualDesagueCaldera
- TFM-MV-WT_01-02-28_PART-CompuertaValvulaManualDesagueCaldera
- TFM-MV-WT_01-03-00_ASSY-CASA
- TFM-MV-WT_01-03-01_PART-Paredes
- TFM-MV-WT_01-03-02_PART-Techo
- TFM-MV-WT_01-03-03_PART-SueloPlantaSuperior
- TFM-MV-WT_01-03-04_PART-SueloPlantaSotano
- TFM-MV-WT_01-03-05_PART-Vigas
- TFM-MV-WT_01-03-06_PART-EstructuraVigasSuperioresColumnas
- TFM-MV-WT_01-03-07_PART-EstructuraVigasSuperioresVigas
- TFM-MV-WT_01-03-08_PART-BaseApoyoDepósitoSuperior
- TFM-MV-WT_01-03-09_PART-MarcoPuertaCasa
- TFM-MV-WT_01-03-10_PART-BloqueSujeciónEjeRotacionViga
- TFM-MV-WT_01-03-11_PART-BloqueRodamientoEjeViga
- TFM-MV-WT_01-03-12_PART-DepósitoSuperior
- TFM-MV-WT_01-03-13_PART-MarcoPuertaHabitacionBomba
- TFM-MV-WT_01-03-14_PART-AguaDelDepositoSuperior

- TFM-MV-WT_01-03-15_PART-VigaParaValvulaDelnyeccion
- TFM-MV-WT_01-03-16_PART-ColumnaParaValvulaDelnyeccion
- TFM-MV-WT_01-03-17_PART-ValvulaDelnyeccionLeva
- TFM-MV-WT_01-03-18_PART-ValvulaDelnyeccionLevaEje
- TFM-MV-WT_01-03-19_PART-ValvulaDelnyeccionCordonLevaPalanca
- TFM-MV-WT_01-04-00_ASSY-VIGAELEVADORA
- TFM-MV-WT_01-04-01_PART-VigaPrincipal
- TFM-MV-WT_01-04-02_PART-VigaPrincipalArcosExtremos
- TFM-MV-WT_01-04-03_PART-VigaPrincipalDiagonalesLargas
- TFM-MV-WT_01-04-04_PART-VigaPrincipalDiagonalesCortas
- TFM-MV-WT_01-04-05_PART-VigaPrincipalDiagonalesMediaEngancheCadenas
- TFM-MV-WT_01-04-06_PART-VigaPrincipalPasadorEngancheCadenas
- TFM-MV-WT_01-04-07_PART-VigaPrincipalChapaEje
- TFM-MV-WT_01-04-08_PART-VigaPrincipalChapaEjePasador
- TFM-MV-WT_01-04-09_PART-VigaPrincipalArcoIntermedio
- TFM-MV-WT_01-04-10_PART-PasadorArcoIntermedio
- TFM-MV-WT_01-04-11_PART-VigaPrincipalEngancheParaPistonCondensador
- TFM-MV-WT_01-05-00_ASSY-BOMBEOINTERIORCASA
- TFM-MV-WT_01-05-01_PART-Vastago
- TFM-MV-WT_01-05-02_PART-VastagoBomba
- TFM-MV-WT_01-05-03_PART-BombaCilindro
- TFM-MV-WT_01-05-04_PART-BombaCilindroTapadera
- TFM-MV-WT_01-05-05_PART-BombaPiston
- TFM-MV-WT_01-05-06_PART-BombaPistonSelloCuero
- TFM-MV-WT_01-05-07_PART-BombaPasadorVastago
- TFM-MV-WT_01-05-08_PART-BombaPasadorVastagoValvulaDelnyeccion
- TFM-MV-WT_01-05-09_PART-BombaValvulaInferior
- TFM-MV-WT_01-05-10_PART-BombaValvulaInferiorTope
- TFM-MV-WT_01-05-11_PART-PasadorVigaVerticalParaCadena
- TFM-MV-WT_01-06-00_ASSY-CONDENSADOR
- TFM-MV-WT_01-06-01_PART-BañeraDeRefrigeracion
- TFM-MV-WT_01-06-02_PART-CilindroCondensador
- TFM-MV-WT_01-06-03_PART-CilindroCondensadorTapadera
- TFM-MV-WT_01-06-04_PART-CilindroBombaDeVacio
- TFM-MV-WT_01-06-05_PART-CilindroBombadeVacioTapadera


































- TFM-MV-WT_01-06-06_PART-TuberiaCondensadorBombaVacio
- TFM-MV-WT_01-06-07_PART-PistonCuerpo
- TFM-MV-WT_01-06-08_PART-PistonBarra
- TFM-MV-WT_01-06-09_PART-PistonSelloBarra
- TFM-MV-WT_01-06-10_PART-PistonBaseParaCompuertas
- TFM-MV-WT_01-06-11_PART-PistonPasadorParaCompuertas
- TFM-MV-WT_01-06-12_PART-PistonCompuertas
- TFM-MV-WT_01-06-13_PART-AltarParaDepositoSalida
- TFM-MV-WT_01-06-14_PART-DepositoDeSalida
- TFM-MV-WT_01-06-15_PART-TuberiaBombaDeVacioDepositoDeSalida
- TFM-MV-WT_01-06-16_PART-ValvulaTuberiaCondensador
- TFM-MV-WT_01-06-17_PART-ValvulaTuberiaCondensadorEje
- TFM-MV-WT_01-06-18_PART-ValvulaTuberiaCondensadorBridaTope
- TFM-MV-WT_01-06-19_PART-ValvulaTuberiaCondensadorEscotilla
- TFM-MV-WT_01-06-20_PART-GanchoPistonViga
- TFM-MV-WT_01-07-00_ASSY-VALVULADEVAPOR
- TFM-MV-WT_01-07-01_PART-ValvulaVaporCompuerta
- TFM-MV-WT_01-07-02_PART-ValvulaVaporBasePalancaCompuerta
- TFM-MV-WT_01-07-03_PART-ValvulaVaporTapaBasePalancaCompuerta
- TFM-MV-WT_01-07-04_PART-ValvulaVaporPasadorBasePalancaCompuerta
- TFM-MV-WT_01-07-05_PART-ValvulaVaporPalancaCompuerta
- TFM-MV-WT_01-07-06_PART-ValvulaVaporLinkHorizontal
- TFM-MV-WT_01-07-07_PART-ValvulaVaporPasadorLinkHorizontalPalanca
- TFM-MV-WT_01-07-08_PART-ValvulaVaporEstribo
- TFM-MV-WT_01-07-09_PART-ValvulaVaporGanchosEstribo
- TFM-MV-WT_01-08-00_ASSY-SISTEMATUBERIAMAESTRAYRAMAS
- TFM-MV-WT_01-08-01_PART-TuberiaMaestra
- TFM-MV-WT_01-08-02_PART-ValvulaTuberiaMaestraBomba
- TFM-MV-WT_01-08-03_PART-ValvulaTuberiaMaestraBombaPasador
- TFM-MV-WT_01-08-04_PART-ValvulaTuberiaMaestraBombaBridaTope
- TFM-MV-WT_01-08-05_PART-ValvulaTuberiaMaestraBombaEscotilla
- TFM-MV-WT_01-09-00_ASSY-TUBERIADESAGUEDEPOSITOSUPERIOR

- ⋮ TFM-MV-WT_01-09-01_PART-TuberíaDesagueDepositoSuperior
- | TFM-MV-WT_01-10-00_ASSY-TUBERIAENTRADAVAPORSUPERIORCILINDRO
- | TFM-MV-WT_01-10-01_PART-TuberíaVaporCilindroParteSuperior
- TFM-MV-WT_01-11-00_ASSY-EXTERIOREDIFICIO_V0-ConEngancheCuerdaPozo
- TFM-MV-WT_01-11-00_ASSY-EXTERIOREDIFICIO_V1-SinEngancheCuerdaPozo
- TFM-MV-WT_01-11-01_PART-SueloExteriorEdificio
- ⌘ TFM-MV-WT_01-11-02_PART-EstructuraSuperficieMina
- 🔧 TFM-MV-WT_01-11-03_PART-TablonesBaseParaEstructura
- ⋮ TFM-MV-WT_01-11-04_PART-BombeoLadoMina
- 🔧 TFM-MV-WT_01-11-05_PART-CuboAguaInteriorMina
- 🔧 TFM-MV-WT_01-11-06_PART-CuboAguaInteriorMinaAgua
- ⋮ TFM-MV-WT_01-11-07_PART-TuberíaEntreCubosDeAgua
- ⋮ TFM-MV-WT_01-11-08_PART-TuberíaEntreCuboDeAguaYPozo
- ⋮ TFM-MV-WT_01-11-09_PART-TuberíaPozo
- ⬇ TFM-MV-WT_01-11-10_PART-BombaPistonInteriorMina
- | TFM-MV-WT_01-11-11_PART-BombaCilindroInteriorMina
- 🔧 TFM-MV-WT_01-11-12_PART-CuboAguaInteriorMina
- TFM-MV-WT_01-11-13_PART-CuboAguaInteriorMinaTuberíaAccesoCilindroBomba
- TFM-MV-WT_01-11-14_PART-ValvulaTubería
- TFM-MV-WT_01-11-15_PART-ValvulaTuberíaEscotilla
- 🔧 TFM-MV-WT_01-11-16_PART-ValvulaTuberíaPasador
- ⊙ TFM-MV-WT_01-11-17_PART-ValvulaTuberíaBridaTope
- ⋮ TFM-MV-WT_01-11-18_PART-TuberíaExpulsionAguaCilindro
- ⋮ TFM-MV-WT_01-11-19_PART-PasadorParaTamborGiratorio
- TFM-MV-WT_01-11-20_PART-TamborGiratorio
- ⌘ TFM-MV-WT_01-11-21_PART-EstructuraParaTamborGiratorio
- 🔧 TFM-MV-WT_01-11-22_PART-TamborGiratorioGrande
- ⋮ TFM-MV-WT_01-11-23_PART-PasadorIzquierdoTamborGiratorioGrande
- ⋮ TFM-MV-WT_01-11-24_PART-PasadorDerechoTamborGiratorioGrande
- 🔧 TFM-MV-WT_01-11-25_PART-PalancaTamborGiratorioGrande
- 🔧 TFM-MV-WT_01-11-26_PART-MangoTamborGiratorioGrande
- 🔧 TFM-MV-WT_01-11-27_PART-TopeMangoTamborGiratorioGrande
- ⌘ TFM-MV-WT_01-11-28_PART-CuerdaTamborGiratorio

- TFM-MV-WT_01-11-29_PART-FinalCuerdaTamborGiratorio
- TFM-MV-WT_01-11-30_PART-ArgollaCuerdaMina
- TFM-MV-WT_01-12-00_ASSY-CADENALADOINTERIOR_V0-CadenaEnDetalle
 - TFM-MV-WT_01-12-00_ASSY-CADENALADOINTERIOR_V1-CadenaSimplificada
- TFM-MV-WT_01-12-01_PART-EslabonCadena_V0-CadenaEnDetalle
 - TFM-MV-WT_01-12-01_PART-EslabonCadena_V1-CadenaSimplificada
- TFM-MV-WT_01-12-02_PART-EslabonCircularCadena_V0-CadenaEnDetalle
- TFM-MV-WT_01-13-00_ASSY-CADENALADOEXTERIOR_V0-CadenaEnDetalle
 - TFM-MV-WT_01-13-00_ASSY-CADENALADOEXTERIOR_V1-CadenaSimplificada
- TFM-MV-WT_01-13-01_PART-EslabonCadena_V0-CadenaEnDetalle
 - TFM-MV-WT_01-13-01_PART-EslabonCadena_V1-CadenaSimplificada
- TFM-MV-WT_01-14-00_ASSY-CADENAINFERIORARCOINTERMEDIO_V0-CadenaEnDetalle
 - TFM-MV-WT_01-14-00_ASSY-CADENAINFERIORARCOINTERMEDIO_V1-CadenaSimplificada
- TFM-MV-WT_01-14-01_PART-EslabonCadenaIntermedia_V0-CadenaEnDetalle
 - TFM-MV-WT_01-14-01_PART-EslabonCadenaIntermedia_V1-CadenaSimplificada
- TFM-MV-WT_01-14-02_PART-EslabonCircularCadenaIntermedia_V0-CadenaEnDetalle
- TFM-MV-WT_01-14-03_PART-EslabonCircularCadenaIntermedia_V0-CadenaEnDetalle
- TFM-MV-WT_01-15-00_ASSY-CADENASUPERIORARCOINTERMEDIO_V0-CadenaEnDetalle
 - TFM-MV-WT_01-15-00_ASSY-CADENASUPERIORARCOINTERMEDIO_V1-CadenaSimplificada
- TFM-MV-WT_01-15-01_PART-EslabonCadenaIntermedia_V0-CadenaEnDetalle
 - TFM-MV-WT_01-15-01_PART-EslabonCadenaIntermedia_V1-CadenaSimplificada
- TFM-MV-WT_01-15-02_PART-EslabonCircularCadenaIntermedia_V0-CadenaEnDetalle
- TFM-MV-WT_01-15-03_PART-EslabonCircularCadenaIntermedia_V0-CadenaEnDetalle
- TFM-MV-WT_01-16-00_ASSY-TUBERIASALIDAVAPORSUPERIORCILINDROCONDENSADOR
 - TFM-MV-WT_01-16-01_PART-TuberíaSuperiorCilindroCodensador
- TFM-MV-WT_01-17-00_ASSY-TUBERIASALIDAVAPORINFERIORCILINDROCONDENSADOR
 - TFM-MV-WT_01-17-01_PART-TuberíaInferiorCilindroCondensador

Anexo IV. Biblioteca CAD de la versión del modelo de la máquina de Watt con colores llamativos para la demostración funcional.

- ◆ TFM-MV-WT_02-00-00_ASSY-ENSAMBLAJE-GENERAL_V0-ModeloCompletoSinMovimiento
- ◆ TFM-MV-WT_02-00-00_ASSY-ENSAMBLAJE-GENERAL_V1-SinEngancheCuerdaPozoCadenaSimplConMov
- | TFM-MV-WT_02-01-00_ASSY-CILINDROPRINCIPAL
- | TFM-MV-WT_02-01-01_PART-Cilindro
- TFM-MV-WT_02-01-02_PART-CilindroTuboVapor
- ♣ TFM-MV-WT_02-01-03_PART-CilindroPistónCuerpo
- TFM-MV-WT_02-01-04_PART-CilindroPistónSelloSuperior
- ✎ TFM-MV-WT_02-01-05_PART-CilindroPistónEnganche
- ✎ TFM-MV-WT_02-01-06_PART-CilindroPistónEnganchePasador
- ✎ TFM-MV-WT_02-01-07_PART-CilindroPistónEnganchePasadorPin
- TFM-MV-WT_02-01-08_PART-CilindroTapaderaCierrePrimero
- TFM-MV-WT_02-01-09_PART-CilindroSelloTapaderaCierrePrimero
- | TFM-MV-WT_02-01-10_PART-CilindroCamisaTermica
- TFM-MV-WT_02-01-11_PART-CilindroBridaCamisaTermica
- TFM-MV-WT_02-01-12_PART-CilindroCamisaTermicaTapadera
- TFM-MV-WT_02-01-13_PART-CilindroSelloTapaderaCierreSegundo
- | TFM-MV-WT_02-01-14_PART-CilindroConexionCalderaCamisaTermica
- ♣ TFM-MV-WT_02-02-00_ASSY-CALDERA
- TFM-MV-WT_02-02-01_PART-CalderaCilindro
- TFM-MV-WT_02-02-02_PART-CalderaCúpulaPlomo
- TFM-MV-WT_02-02-03_PART-CalderaTapaSuperiorCúpula
- ♣ TFM-MV-WT_02-02-04_PART-CalderaEncapsuladoLadrillo
- ♣ TFM-MV-WT_02-02-05_PART-CalderaAnilloRejilla
- ◆ TFM-MV-WT_02-02-06_PART-CalderaPuertaCombustible
- ✎ TFM-MV-WT_02-02-07_PART-CalderaBridaPuerta1
- ✎ TFM-MV-WT_02-02-08_PART-CalderaBridaPuerta2
- ✎ TFM-MV-WT_02-02-09_PART-CalderaPasadorBridaPuerta
- ✎ TFM-MV-WT_02-02-10_PART-CalderaBridaCierrePuerta1
- ♣ TFM-MV-WT_02-02-11_PART-CalderaEngancheCierrePuerta
- ♣ TFM-MV-WT_02-02-12_PART-CalderaBridaTuberíaAguaRelleno

-  TFM-MV-WT_02-02-13_PART-CalderaColumnaTopesValvulaVapor
-  TFM-MV-WT_02-02-14_PART-CalderaTablonTopesValvulaVapor
-  TFM-MV-WT_02-02-15_PART-CalderaApoyoEnramadaValvulaVapor
-  TFM-MV-WT_02-02-16_PART-CalderaEnramadaValvulaVapor
-  TFM-MV-WT_02-02-17_PART-ValvulaVaporPalancaY
-  TFM-MV-WT_02-02-18_PART-CalderaTablonTopesValvulaVapor
-  TFM-MV-WT_02-02-19_PART-ValvulaVaporPalancaYPeso
-  TFM-MV-WT_02-02-20_PART-ValvulaVaporPalancaYPequeña
-  TFM-MV-WT_02-02-21_PART-AguaDeLaCaldera
-  TFM-MV-WT_02-02-22_PART-MedidorNivelDeAguaCaldera
-  TFM-MV-WT_02-02-23_PART-MedidorNivelDeAguaCalderaIndicador
-  TFM-MV-WT_02-02-24_PART-TuberiaDesagueManualCaldera
-  TFM-MV-WT_02-02-25_PART-ManillaValvulaManualDesagueCaldera
-  TFM-MV-WT_02-02-26_PART-PasadorValvulaManualDesagueCaldera
-  TFM-MV-WT_02-02-27_PART-BolaValvulaManualDesagueCaldera
-  TFM-MV-WT_02-02-28_PART-CompuertaValvulaManualDesagueCaldera
-  TFM-MV-WT_02-03-00_ASSY-CASA
-  TFM-MV-WT_02-03-01_PART-Paredes
-  TFM-MV-WT_02-03-02_PART-Techo
-  TFM-MV-WT_02-03-03_PART-SueloPlantaSuperior
-  TFM-MV-WT_02-03-04_PART-SueloPlantaSotano
-  TFM-MV-WT_02-03-05_PART-Vigas
-  TFM-MV-WT_02-03-06_PART-EstructuraVigasSuperioresColumnas
-  TFM-MV-WT_02-03-07_PART-EstructuraVigasSuperioresVigas
-  TFM-MV-WT_02-03-08_PART-BaseApoyoDepósitoSuperior
-  TFM-MV-WT_02-03-09_PART-MarcoPuertaCasa
-  TFM-MV-WT_02-03-10_PART-BloqueSujeciónEjeRotacionViga
-  TFM-MV-WT_02-03-11_PART-BloqueRodamientoEjeViga
-  TFM-MV-WT_02-03-12_PART-DepósitoSuperior
-  TFM-MV-WT_02-03-13_PART-MarcoPuertaHabitationBomba
-  TFM-MV-WT_02-03-14_PART-AguaDelDepositoSuperior
-  TFM-MV-WT_02-03-15_PART-VigaParaValvulaDelInyeccion
-  TFM-MV-WT_02-03-16_PART-ColumnaParaValvulaDelInyeccion

- TFM-MV-WT_02-03-17_PART-ValvulaDelInyeccionLeva
- TFM-MV-WT_02-03-18_PART-ValvulaDelInyeccionLevaEje
- TFM-MV-WT_02-03-19_PART-ValvulaDelInyeccionCordonLevaPalanca
- TFM-MV-WT_02-04-00_ASSY-VIGAELEVADORA
- TFM-MV-WT_02-04-01_PART-VigaPrincipal
- TFM-MV-WT_02-04-02_PART-VigaPrincipalArcosExtremos
- TFM-MV-WT_02-04-03_PART-VigaPrincipalDiagonalesLargas
- TFM-MV-WT_02-04-04_PART-VigaPrincipalDiagonalesCortas
- TFM-MV-WT_02-04-05_PART-VigaPrincipalDiagonalesMediaEngancheCadenas
- TFM-MV-WT_02-04-06_PART-VigaPrincipalPasadorEngancheCadenas
- TFM-MV-WT_02-04-07_PART-VigaPrincipalChapaEje
- TFM-MV-WT_02-04-08_PART-VigaPrincipalChapaEjePasador
- TFM-MV-WT_02-04-09_PART-VigaPrincipalArcoIntermedio
- TFM-MV-WT_02-04-10_PART-PasadorArcoIntermedio
- TFM-MV-WT_02-04-11_PART-VigaPrincipalEngancheParaPistonCondensador
- TFM-MV-WT_02-05-00_ASSY-BOMBEOINTERIORCASA
- TFM-MV-WT_02-05-01_PART-Vastago
- TFM-MV-WT_02-05-02_PART-VastagoBomba
- TFM-MV-WT_02-05-03_PART-BombaCilindro
- TFM-MV-WT_02-05-04_PART-BombaCilindroTapadera
- TFM-MV-WT_02-05-05_PART-BombaPiston
- TFM-MV-WT_02-05-06_PART-BombaPistonSelloCuero
- TFM-MV-WT_02-05-07_PART-BombaPasadorVastago
- TFM-MV-WT_02-05-08_PART-BombaPasadorVastagoValvulaDelInyeccion
- TFM-MV-WT_02-05-09_PART-BombaValvulaInferior
- TFM-MV-WT_02-05-10_PART-BombaValvulaInferiorTope
- TFM-MV-WT_02-05-11_PART-PasadorVigaVerticalParaCadena
- TFM-MV-WT_02-06-00_ASSY-CONDENSADOR
- TFM-MV-WT_02-06-01_PART-BañeraDeRefrigeracion
- TFM-MV-WT_02-06-02_PART-CilindroCondensador
- TFM-MV-WT_02-06-03_PART-CilindroCondensadorTapadera
- TFM-MV-WT_02-06-04_PART-CilindroBombaDeVacio
- TFM-MV-WT_02-06-05_PART-CilindroBombadeVacioTapadera
- TFM-MV-WT_02-06-06_PART-TuberiaCondensadorBombaVacio

- TFM-MV-WT_02-06-07_PART-PistonCuerpo
- TFM-MV-WT_02-06-08_PART-PistonBarra
- TFM-MV-WT_02-06-09_PART-PistonSelloBarra
- TFM-MV-WT_02-06-10_PART-PistonBaseParaCompuertas
- ✂ TFM-MV-WT_02-06-11_PART-PistonPasadorParaCompuertas
- TFM-MV-WT_02-06-12_PART-PistonCompuertas
- ▮ TFM-MV-WT_02-06-13_PART-AltarParaDepositoSalida
- ▮ TFM-MV-WT_02-06-14_PART-DepositoDeSalida
- ✂ TFM-MV-WT_02-06-15_PART-TuberiaBombaDeVacioDepositoDeSalida
- TFM-MV-WT_02-06-16_PART-ValvulaTuberiaCondensador
- TFM-MV-WT_02-06-17_PART-ValvulaTuberiaCondensadorEje
- TFM-MV-WT_02-06-18_PART-ValvulaTuberiaCondensadorBridaTope
- TFM-MV-WT_02-06-19_PART-ValvulaTuberiaCondensadorEscotilla
- ✂ TFM-MV-WT_02-06-20_PART-GanchoPistonViga
- ⚙ TFM-MV-WT_02-07-00_ASSY-VALVULADEVAPOR
- TFM-MV-WT_02-07-01_PART-ValvulaVaporCompuerta
- ▮ TFM-MV-WT_02-07-02_PART-ValvulaVaporBasePalancaCompuerta
- TFM-MV-WT_02-07-03_PART-ValvulaVaporTapaBasePalancaCompuerta
- ▮ TFM-MV-WT_02-07-04_PART-ValvulaVaporPasadorBasePalancaCompuerta
- ✂ TFM-MV-WT_02-07-05_PART-ValvulaVaporPalancaCompuerta
- ✂ TFM-MV-WT_02-07-06_PART-ValvulaVaporLinkHorizontal
- ✂ TFM-MV-WT_02-07-07_PART-ValvulaVaporPasadorLinkHorizontalPalanca
- TFM-MV-WT_02-07-08_PART-ValvulaVaporEstribo
- ✂ TFM-MV-WT_02-07-09_PART-ValvulaVaporGanchosEstribo
- ⌋ TFM-MV-WT_02-08-00_ASSY-SISTEMATUBERIAMAESTRAYRAMAS
- ⌋ TFM-MV-WT_02-08-01_PART-TuberiaMaestra
- TFM-MV-WT_02-08-02_PART-ValvulaTuberiaMaestraBomba
- TFM-MV-WT_02-08-03_PART-ValvulaTuberiaMaestraBombaPasador
- TFM-MV-WT_02-08-04_PART-ValvulaTuberiaMaestraBombaBridaTope
- TFM-MV-WT_02-08-05_PART-ValvulaTuberiaMaestraBombaEscotilla
- ⌋ TFM-MV-WT_02-09-00_ASSY-TUBERIADESAGUEDEPOSITOSUPERIOR
- ⌋ TFM-MV-WT_02-09-01_PART-TuberiaDesagueDepositoSuperior
- ⌋ TFM-MV-WT_02-10-00_ASSY-TUBERIAENTRADAVAPORSUPERIORCILINDRO

- | TFM-MV-WT_02-10-01_PART-TuberíaVaporCilindroParteSuperior
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-00_ASSY-EXTERIOREDIFICIO_V0-ConEngancheCuerdaPozo
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-00_ASSY-EXTERIOREDIFICIO_V1-SinEngancheCuerdaPozo
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-01_PART-SueloExteriorEdificio
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-02_PART-EstructuraSuperficieMina
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-03_PART-TablonesBaseParaEstructura
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-04_PART-BombeoLadoMina
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-05_PART-CuboAguInteriorMina
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-06_PART-CuboAguInteriorMinaAgua
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-07_PART-TuberíaEntreCubosDeAgua
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-08_PART-TuberíaEntreCuboDeAguaYPozo
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-09_PART-TuberíaPozo
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-10_PART-BombaPistonInteriorMina
- | TFM-MV-WT_02-11-11_PART-BombaCilindroInteriorMina
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-12_PART-CuboAguInteriorMina
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-13_PART-CuboAguInteriorMinaTuberíaAccesoCilindroBomba
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-14_PART-ValvulaTubería
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-15_PART-ValvulaTuberíaEscotilla
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-16_PART-ValvulaTuberíaPasador
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-17_PART-ValvulaTuberíaBridaTope
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-18_PART-TuberíaExpulsionAguaCilindro
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-19_PART-PasadorParaTamborGiratorio
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-20_PART-TamborGiratorio
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-21_PART-EstructuraParaTamborGiratorio
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-22_PART-TamborGiratorioGrande
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-23_PART-PasadorIzquierdoTamborGiratorioGrande
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-24_PART-PasadorDerechoTamborGiratorioGrande
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-25_PART-PalancaTamborGiratorioGrande
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-26_PART-MangoTamborGiratorioGrande
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-27_PART-TopeMangoTamborGiratorioGrande
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-28_PART-CuerdaTamborGiratorio
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-29_PART-FinalCuerdaTamborGiratorio
- ◆ TFM-MV-WT_02-11-30_PART-ArgollaCuerdaMina

- TFM-MV-WT_02-12-00_ASSY-CADENALADOINTERIOR_V0-CadenaEnDetalle
 - TFM-MV-WT_02-12-00_ASSY-CADENALADOINTERIOR_V1-CadenaSimplificada
- TFM-MV-WT_02-12-01_PART-EslabonCadena_V0-CadenaEnDetalle
 - TFM-MV-WT_02-12-01_PART-EslabonCadena_V1-CadenaSimplificada
- TFM-MV-WT_02-12-02_PART-EslabonCircularCadena_V0-CadenaEnDetalle
 - TFM-MV-WT_02-13-00_ASSY-CADENALADOEXTERIOR_V0-CadenaEnDetalle
 - TFM-MV-WT_02-13-00_ASSY-CADENALADOEXTERIOR_V1-CadenaSimplificada
- TFM-MV-WT_02-13-01_PART-EslabonCadena_V0-CadenaEnDetalle
 - TFM-MV-WT_02-13-01_PART-EslabonCadena_V1-CadenaSimplificada
- TFM-MV-WT_02-14-00_ASSY-CADENAINFERIORARCOINTERMEDIO_V0-CadenaEnDetalle
 - TFM-MV-WT_02-14-00_ASSY-CADENAINFERIORARCOINTERMEDIO_V1-CadenaSimplificada
- TFM-MV-WT_02-14-01_PART-EslabonCadenaIntermedia_V0-CadenaEnDetalle
 - TFM-MV-WT_02-14-01_PART-EslabonCadenaIntermedia_V1-CadenaSimplificada
- TFM-MV-WT_02-14-02_PART-EslabonCircularCadenaIntermedia_V0-CadenaEnDetalle
- TFM-MV-WT_02-14-03_PART-EslabonCircularCadenaIntermedia_V0-CadenaEnDetalle
- TFM-MV-WT_02-15-00_ASSY-CADENASUPERIORARCOINTERMEDIO_V0-CadenaEnDetalle
 - TFM-MV-WT_02-15-00_ASSY-CADENASUPERIORARCOINTERMEDIO_V1-CadenaSimplificada
- TFM-MV-WT_02-15-01_PART-EslabonCadenaIntermedia_V0-CadenaEnDetalle
 - TFM-MV-WT_02-15-01_PART-EslabonCadenaIntermedia_V1-CadenaSimplificada
- TFM-MV-WT_02-15-02_PART-EslabonCircularCadenaIntermedia_V0-CadenaEnDetalle
- TFM-MV-WT_02-15-03_PART-EslabonCircularCadenaIntermedia_V0-CadenaEnDetalle
- TFM-MV-WT_02-16-00_ASSY-TUBERIASALIDAVAPORSUPERIORCILINDROCONDENSADOR
 - TFM-MV-WT_02-16-01_PART-TuberíaSuperiorCilindroCodensador
- TFM-MV-WT_02-17-00_ASSY-TUBERIASALIDAVAPORINFERIORCILINDROCONDENSADOR
 - TFM-MV-WT_02-17-01_PART-TuberíaInferiorCilindroCondensador

Anexo V. Código MATLAB del estudio termodinámico de la máquina de Newcomen.

```

1 %% Datos
2 N = 12; % Velocidad de la máquina en carreras del pistón/minuto.
3 delta_z_mina = 46; % Profundidad total de la mina en metros.
4 delta_z_b1 = 22.86; % Profundidad de la bomba más profunda de la mina, en metros.
5 delta_z_b2 = 12.86; % Profundidad de la bomba menos profunda de la mina, en metros.
6 delta_z_tot = delta_z_b1 + delta_z_b2; % Suma de las dos profundidades anteriores, en metros.
7 D_cil_pr = 0.550; % Diámetro interior del cilindro principal de la máquina, en metros.
8 D_bomba_mina = 0.21; % Diámetro de las bombas de la mina, en metros.
9 V_ag_bombeada_mina = 45.45; % Flujo volumétrico del agua bombeada por el sistema de bombeo de la mina, en litros/carrera.
10 V_ag_v = 2548.52; % Flujo volumétrico del agua que se evapora en la caldera, en litros/hora.
11 V_carb = 8.5; % Flujo volumétrico del carbón alimentado a la caldera, en fanegas/hora.
12 rho_carb = 38.1018; % Densidad del carbón alimentado a la caldera, en kg/fanega.
13 VC_carb = 25804.5; % Valor calorífico medio del carbón de Reino Unido, en kJ/kg.
14 vf_ag_cald = 1.0143e-03; % Volumen específico del agua suministrada a la caldera (a 54,4°C), en m3/kg. Obtenido de las Tablas Termodinámicas de Vapor.
15 hg = 2656.77; % Entalpía de vapor saturado a 0,65 bar, en kJ/kg. Obtenido de las Tablas Termodinámicas de Vapor.
16 hf = 227.72; % Entalpía de líquido saturado del vapor a 54,4°C, en kJ/kg. Obtenido de las Tablas Termodinámicas de Vapor.
17 L_carrera = 1.791; % Longitud de carrera de los pistones del cilindro principal y de las bombas de la mina, en metros.
18 W_esp_ag_mina = 9802.27; % Peso específico del agua fría y fresca de la mina, en N/m3.
19 MEP = 65; % Presión Media Efectiva de la máquina, en kPa.
20
21
22 %% Análisis de la caldera
23
24 m_carb = rho_carb * V_carb; % Flujo másico del carbón alimentado a la caldera, en kg/h.
25 rho_ag_cald = 1 / vf_ag_cald; % Densidad del agua suministrada a la caldera, en kg/m3.
26 m_ag_v = rho_ag_cald * V_ag_v * 1e-03; % Flujo másico del agua evaporada, en kg/h.
27 delta_h = hg-hf; % Cambio de entalpía durante la evaporización del agua, en kJ/kg.
28 Qv = m_ag_v * delta_h; % Potencia calorífica suministrada por la caldera, en kJ/h.
29 E_carb = m_carb * VC_carb; % Potencia disponible por el carbón usado como combustible, en kJ/h.
30 Ef_caldera = Qv / E_carb * 100; % Eficiencia de la caldera.
31
32
33 %% Análisis del sistema de bombeo
34
35 V_bomba_mina = (pi * D_bomba_mina^2 / 4) * L_carrera; % Volumen desplazado por el pistón de cada bomba de la mina, en m3.
36 V_ag_a_bombear_mina_b1 = (pi * D_bomba_mina^2 / 4) * delta_z_b1; % Volumen del agua que desplazaría la bomba más profunda de la mina, si fuese 100% eficiente, en m3.
37 V_ag_a_bombear_mina_b2 = (pi * D_bomba_mina^2 / 4) * delta_z_b2; % Volumen del agua que desplazaría la bomba menos profunda de la mina, si fuese 100% eficiente, en m3.
38 V_ag_a_bombear_mina = V_ag_a_bombear_mina_b1 + V_ag_a_bombear_mina_b2; % Volumen total del agua que desplazaría el sistema de bombeo de la mina, si fuese 100% eficiente, en m3.
39 W_t_ag = W_esp_ag_mina * V_ag_a_bombear_mina; % Peso del agua que elevaría el sistema de bombeo de la mina, si fuese 100% eficiente, en N.
40 W_bomba_mina = W_t_ag * L_carrera; % Trabajo realizado por las dos bombas del sistema de bombeo de la mina, en N.m.
41 W_bomba_mina_bhp = W_bomba_mina * N * (1 / 44760); % Potencia de freno entregada por el sistema de bombeo de la mina, en bhp.
42 V_flujo_ag_bombeada_mina = V_ag_bombeada_mina * N * 1e-03; % Flujo volumétrico del agua bombeada por el sistema de bombeo de la mina, en m3/min.
43 W_bomba_mina_whp = W_esp_ag_mina * V_flujo_ag_bombeada_mina * delta_z_tot * (1 / 44762); % Potencia del agua impulsada por el sistema de bombeo, en whp.
44 Ef_bombeo = W_bomba_mina_whp / W_bomba_mina_bhp * 100; % Eficiencia del sistema de bombeo.
45
46
47 %% Análisis Mecánico
48
49 delta_V_recorr = (pi * D_cil_pr^2 / 4) * L_carrera; % Volumen desplazado por el pistón durante su carrera, en m3.
50 W_cil_pr = MEP * 1e03 * delta_V_recorr; % Trabajo realizado por el cilindro principal de la máquina, en Pa.m3/carrera (J/carrera).
51 W_cil_pr_ihp = W_cil_pr * N * (1 / 44762); % Potencia entregada por el cilindro principal de la máquina, en ihp.
52 Ef_mecanica = W_bomba_mina_bhp / W_cil_pr_ihp * 100; % Eficiencia mecánica de la máquina.
53
54
55 %% Eficiencia Global
56
57 W_bomba_mina_Vatio = W_esp_ag_mina * V_flujo_ag_bombeada_mina * delta_z_tot / 60; % Potencia del agua impulsada por el sistema de bombeo, en Vatios.
58 E_carb_Vatio = E_carb * 1e03 / 3600; % Potencia disponible por el carbón usado como combustible, en Vatios.
59 Ef_global = W_bomba_mina_Vatio / E_carb_Vatio * 100; % Eficiencia global de la máquina.
60
61
62 %% Rendimiento Térmico
63
64 Ef_termica = (Ef_global / 100) / ((Ef_caldera / 100) * (Ef_mecanica / 100) * (Ef_bombeo / 100)) * 100; % Eficiencia térmica de la máquina.
65
66

```

Anexo VI. Código MATLAB del estudio termodinámico de la máquina de Watt.

```

1 %% Datos
2 N = 29.5; % Velocidad de la máquina en carreras del pistón/minuto.
3 delta_z_mina = 46; % Profundidad total de la mina en metros.
4 delta_z_b1 = 22.86; % Profundidad de la bomba más profunda de la mina, en metros.
5 delta_z_b2 = 12.86; % Profundidad de la bomba menos profunda de la mina, en metros.
6 delta_z_tot = delta_z_b1 + delta_z_b2; % Suma de las dos profundidades anteriores, en metros.
7 D_cil_pr = 0.60; % Diámetro interior del cilindro principal de la máquina, en metros.
8 D_bomba_mina = 0.25; % Diámetro de las bombas de la mina, en metros.
9 V_ag_bombeada_mina = 87.257; % Flujo volumétrico del agua bombeada por el sistema de bombeo de la mina, en litros/carrera.
10 V_ag_v = 1389.45; % Flujo volumétrico del agua que se evapora en la caldera, en litros/hora.
11 V_carb = 4.25; % Flujo volumétrico del carbón alimentado a la caldera, en fanegas/hora.
12 rho_carb = 38.1018; % Densidad del carbón alimentado a la caldera, en kg/fanega.
13 VC_carb = 25004.5; % Valor calorífico medio del carbón de Reino Unido, en kJ/kg.
14 vf_ag_cald = 1.0143e-03; % Volumen específico del agua suministrada a la caldera (a 54,4°C), en m³/kg. Obtenido de las Tablas Termodinámicas de Vapor.
15 hg = 2660.00; % Entalpía de vapor saturado a 0,70 bar, en kJ/kg. Obtenido de las Tablas Termodinámicas de Vapor.
16 hf = 227.72; % Entalpía de líquido saturado del vapor a 54,4°C, en kJ/kg. Obtenido de las Tablas Termodinámicas de Vapor.
17 L_carrera = 2.1154; % Longitud de carrera de los pistones del cilindro principal y de las bombas de la mina, en metros.
18 W_esp_ag_mina = 9802.27; % Peso específico del agua fría y fresca de la mina, en N/m³.
19 MEP = 70; % Presión Media Efectiva de la máquina, en kPa.
20
21
22 %% Análisis de la caldera
23
24 m_carb = rho_carb * V_carb; % Flujo másico del carbón alimentado a la caldera, en kg/h.
25 rho_ag_cald = 1 / vf_ag_cald; % Densidad del agua suministrada a la caldera, en kg/m³.
26 m_ag_v = rho_ag_cald * V_ag_v * 1e-03; % Flujo másico del agua evaporada, en kg/h.
27 delta_h = hg - hf; % Cambio de entalpía durante la evaporización del agua, en kJ/kg.
28 Qv = m_ag_v * delta_h; % Potencia calorífica suministrada por la caldera, en kJ/h.
29 E_carb = m_carb * VC_carb; % Potencia disponible por el carbón usado como combustible, en kJ/h.
30 Ef_caldera = Qv / E_carb * 100; % Eficiencia de la caldera.
31
32
33 %% Análisis del sistema de bombeo
34
35 V_bomba_mina = (pi * D_bomba_mina^2 / 4) * L_carrera; % Volumen desplazado por el pistón de cada bomba de la mina, en m³.
36 V_ag_a_bompear_mina_b1 = (pi * D_bomba_mina^2 / 4) * delta_z_b1; % Volumen del agua que desplazaría la bomba más profunda de la mina, si fuese 100% eficiente, en m³.
37 V_ag_a_bompear_mina_b2 = (pi * D_bomba_mina^2 / 4) * delta_z_b2; % Volumen del agua que desplazaría la bomba menos profunda de la mina, si fuese 100% eficiente, en m³.
38 V_ag_a_bompear_mina = V_ag_a_bompear_mina_b1 + V_ag_a_bompear_mina_b2; % Volumen total del agua que desplazaría el sistema de bombeo de la mina, si fuese 100% eficiente, en m³.
39 W_t_ag = W_esp_ag_mina * V_ag_a_bompear_mina; % Peso del agua que elevaría el sistema de bombeo de la mina, si fuese 100% eficiente, en N.
40 W_bomba_mina = W_t_ag * L_carrera; % Trabajo realizado por las dos bombas del sistema de bombeo de la mina, en N.m.
41 W_bomba_mina_bhp = W_bomba_mina * N * (1 / 44760); % Potencia de freno entregada por el sistema de bombeo de la mina, en bhp.
42 V_flujo_ag_bombeada_mina = V_ag_bombeada_mina * N * 1e-03; % Flujo volumétrico del agua bombeada por el sistema de bombeo de la mina, en m³/min.
43 W_bomba_mina_whp = W_esp_ag_mina * V_flujo_ag_bombeada_mina * delta_z_tot * (1 / 44762); % Potencia del agua impulsada por el sistema de bombeo, en whp.
44 Ef_bombeo = W_bomba_mina_whp / W_bomba_mina_bhp * 100; % Eficiencia del sistema de bombeo.
45
46
47 %% Análisis Mecánico
48
49 delta_V_recorr = (pi * D_cil_pr^2 / 4) * L_carrera; % Volumen desplazado por el pistón durante su carrera, en m³.
50 W_cil_pr = MEP * 1e03 * delta_V_recorr; % Trabajo realizado por el cilindro principal de la máquina, en Pa.m³/carrera (J/carrera).
51 W_cil_pr_ihp = W_cil_pr * N * (1 / 44762); % Potencia entregada por el cilindro principal de la máquina, en ihp.
52 Ef_mecanica = W_bomba_mina_bhp / W_cil_pr_ihp * 100; % Eficiencia mecánica de la máquina.
53
54
55 %% Eficiencia Global
56
57 W_bomba_mina_Vatio = W_esp_ag_mina * V_flujo_ag_bombeada_mina * delta_z_tot / 60; % Potencia del agua impulsada por el sistema de bombeo, en Vatios.
58 E_carb_Vatio = E_carb * 1e03 / 3600; % Potencia disponible por el carbón usado como combustible, en Vatios.
59 Ef_global = W_bomba_mina_Vatio / E_carb_Vatio * 100; % Eficiencia global de la máquina.
60
61
62 %% Rendimiento Térmico
63
64 Ef_termica = (Ef_global / 100) / ((Ef_caldera / 100) * (Ef_mecanica / 100) * (Ef_bombeo / 100)) * 100; % Eficiencia térmica de la máquina.
65
66

```

Anexo VII. Patente de la primera máquina de vapor de James Watt.



A.D. 1769 N° 913.

Steam Engines, &c.

WATT'S SPECIFICATION.

TO ALL TO WHOM THESE PRESENTS SHALL COME, I, JAMES WATT, of Glasgow, in Scotland, Merchant, send greeting.

WHEREAS His most Excellent Majesty King George the Third, by His Letters Patent under the Great Seal of Great Britain, bearing date the Fifth
 5 day of January, in the ninth year of His said Majesty's reign, did give and grant unto me, the said James Watt, His special licence, full power, sole privilege and authority, that I, the said James Watt, my exors, admors, and assigns, should and lawfully might, during the term of years therein expressed, use, exercise, and vend, throughout that part of His Majesty's
 10 Kingdom of Great Britain called England, the Dominion of Wales, and Town of Berwick upon Tweed, and also in His Majesty's Colonies and Plantations abroad, my "**NEW INVENTED METHOD OF LESSENING THE CONSUMPTION OF STEAM AND FUEL IN FIRE ENGINES**;" in which said recited Letters Patent is contained a proviso obliging me, the said James Watt, by writing under my hand and seal, to
 15 cause a particular description of the nature of the said Invention to be inrolled in His Majesties High Court of Chancery within four calendar months after the date of the said recited Letters Patent, as in and by the said Letters Patent, and the Statute in that behalf made, relation being thereunto respectively had, may more at large appear.

20 **NOW KNOW YE**, that in compliance with the said provisoe, and in pursuance of the said Statute, I, the said James Watt, do hereby declare that the

Watt's Method of Lessening the Consumption of Steam & Fuel in Fire Engines.

following is a particular description of the nature of my said Invention, and of the manner in which the same is to be performed (that is to say):—

My method of lessening the consumption of steam, and consequently fuel, in fire engines consists of the following principles:—

First, that vessell in which the powers of steam are to be employed to work 5
the engine, which is called the cylinder in common fire engines, and which I
call the steam vessell, must during the whole time the engine is at work be
kept as hot as the steam that enters it, first, by enclosing it in a case of wood
or any other materials that transmit heat slowly; secondly, by surrounding it
with steam or other heated bodies; and, thirdly, by suffering neither water 10
or any other substance colder than the steam to enter or touch it during
that time.

Secondly, in engines that are to be worked wholly or partially by condensa-
tion of steam, the steam is to be condensed in vessells distinct from the steam
vessells or cylinders, although occasionally communicating with them. These 15
vessells I call condensers, and whilst the engines are working, these con-
densers ought at least to be kept as cold as the air in the neighbourhood of
the engines by application of water or other cold bodies.

Thirdly, whatever air or other elastic vapour is not condensed by the cold
of the condenser, and may impede the working of the engine, is to be drawn 20
out of the steam vessells or condensers, by means of pumps wrought by the
engines themselves, or otherwise.

Fourthly, I intend in many cases to employ the expansive force of steam to
press on the pistons, or whatever may be used instead of them, in the same
manner as the pressure of the atmosphere is now employed in common fire 25
engines. In cases where cold water cannot be had in plenty, the engines may
be wrought by this force of steam only, by discharging the steam into the open
air after it has done its office.

Fifthly, where motions round an axis are required, I make the steam vessells
in form of hollow rings or circular channels, with proper inlets and outlets for 30
the steam, mounted on horizontal axles like the wheels of a water mill; within
them are placed a number of valves that suffer any body to go round the
channell in one direction only. In these steam vessells are placed weights, so
fitted to them as intirely to fill up a part or portion of their channels, yet
rendered capable of moving freely in them by the means herein-after mentioned 35
or specified. When the steam is admitted in these engines between these
weights and the valves, it acts equally on both, so as to raise the weight to one
side of the wheel, and by the reaction on the valves successively to give a
circular motion to the wheel, the valves opening in the direction in which the

A.D. 1769.—N° 913.

3

Watt's Method of Lessening the Consumption of Steam & Fuel in Fire Engines.

weights are pressed, but not in the contrary. As the steam vessel moves round it is supplied with steam from the boiler, and that which has performed its office may either be discharged by means of condensers, or into the open air.

Sixthly, I intend in some cases to apply a degree of cold not capable of
5 reducing the steam to water, but of contracting it considerably, so that the engines shall be worked by the alternate expansion and contraction of the steam.

Lastly, instead of using water to render the piston or other parts of the engines air and steam tight, I employ oils, wax, rosinous bodies, fat of animals,
10 quicksilver and other metals, in their fluid state.

In witness whereof, I have hereunto set my hand and seal, this Twenty-fifth day of April, in the year of our Lord One thousand seven hundred and sixty-nine.

JAMES WATT. (L.S.)

15 Sealed and delivered in the presence of

COLL. WILKIE.

GEO. JARDINE.

JOHN ROEBUCK.

Be it remembered, that the said James Watt doth not intend that any
20 thing in the fourth article shall be understood to extend to any engine where the water to be raised enters the steam vessell itself, or any vessell having an open communication with it.

JAMES WATT.

Witnesses,

25 COLL. WILKIE.

GEO. JARDINE.

AND BE IT REMEMBERED, that on the Twenty-fifth day of April, in the year of our Lord 1769, the aforesaid James Watt came before our said Lord the King in His Chancery, and acknowledged the Specification aforesaid,
30 and all and every thing therein contained and specified, in form above written. And also the Specification aforesaid was stampd according to the tenor of the Statute made in the sixth year of the reign of the late King and Queen William and Mary of England, and so forth.

Inrolled the Twenty-ninth day of April, in the year of our Lord One
35 thousand seven hundred and sixty-nine.

LONDON :

Printed by GEORGE EDWARD EYRE and WILLIAM SPOTTISWOODE,
Printers to the Queen's most Excellent Majesty. 1855.

WILKIE, Ect:3

Anexo VIII. Patente de la segunda máquina de vapor de James Watt.



A.D. 1781 N° 1306.

Steam Engines.

WATT'S SPECIFICATION.

TO ALL TO WHOM THESE PRESENTS SHALL COME, I, JAMES WATT, of Birmingham, in the County of Warwick, Engineer, send greeting.

WHEREAS His most Excellent Majesty King George the Third, by His Letters Patent under the Great Seal of Great Britain, bearing date at Westminster, the Twenty-fifth day of October, in the twenty-second year of His
 5 reign, did give and grant unto me, the said James Watt, my eñors, adñiors, and assigns, His especial licence, full power, sole priviledge and authority, that I, the said James Watt, my eñors, adñiors, and assigns, should and lawfully might, during the term of years therein expressed, make, use, exercise,
 10 and vend, within that part of His Majesty's Kingdom of Great Britain called England, His Dominion of Wales, and Town of Berwick upon Tweed, my Invention of "**CERTAIN NEW METHODS OF APPLYING THE VIBRATING OR RECIPROCATING MOTION OF STEAM OR FIRE ENGINES TO PRODUCE A CONTINUED ROTATIVE OR CIRCULAR MOTION ROUND AN AXIS OR CENTRE, AND THEREBY TO GIVE MOTION**
 15 **TO THE WHEELS OF MILLS OR OTHER MACHINES;**" in which said recited Letters Patent is contained a proviso obliging me, the said James Watt, by an instrument in writing under my hand and seal, to cause a particular description of the nature of my said Invention, and in what manner the same is to be performed to be inrolled in His Majesty's High Court of Chancery within four
 20 calendar months next and immediately after the date of the said Letters Patent, as in and by the said Letters Patent, relation being thereunto had, may more at large appear.

Watt's Improvements in Steam Engines.

NOW KNOW YE, that in compliance with the said proviso, I, the said James Watt, do hereby declare that the nature of my said Invention, and the manner in which the same is to be performed, is particularly described and ascertained in manner and form following (that is to say):—

The fire or steam engines whose vibrating or reciprocating motions are to be converted into rotative motions by any or all of the five methods hereinafter described, may be constructed either upon the principles of the steam engines called Newcomen's fire or steam engines, (which have been hitherto most commonly used,) or more advantageously upon the principles of those newly improved steam or fire engines of my Invention, (the sole use and property of which was granted to me by His present Majesty's Royal Letters Patent, dated in the ninth year, and by an Act of Parliament made and passed in the fifteenth year of His reign); or the said engines may be constructed in any other manner or mode wherein a piston or any other part of the said steam or fire engine has a vibrating, alternating, or reciprocating motion; therefore, as for the aforesaid purpose no peculiar construction is required in those parts of the steam or fire engines which concur in and are necessary for the producing the power or active force of the engine and its vibratory or reciprocating motion, and as steam or fire engines are common and well known machines, it is not necessary to enter into any description of them, I proceed to explain my newly invented methods of applying the vibrating or reciprocating motions of steam or fire engines to produce a continued rotative or circular motion round an axis or centre, and thereby to give motion to the wheels of mills and other machines, which methods are five in number, and are described as followeth:—

In the first of these methods I employ the power of the steam engine either directly or by the intervention of a lever or levers, to pull, push, or press a friction wheel or pulley against the lateral surface of a wheel fixed obliquely upon the primary axis, shaft, or wheel which is to receive the rotative motion, which lateral surface of the said oblique or inclined wheel is represented by the section of a hollow cylinder (A, B, C,) in the Drawing, No. 1, Fig. 1st), cut or sawn off at the angle of sixty-five degrees to its axis, or at any other angle which may be convenient or useful; and the said friction wheel or pulley (J) is impelled or pulled by the power of the steam engine against the said lateral surface of the inclined wheel (A, C,) in a direction which is in one way parallel to the said primary axis or shaft (D, E,) of the said obliquely cut cylinder or inclined wheel (A, C); therefore, the friction wheel (J), commencing its motion at the lowest or nearest part (C) of the said

Watt's Improvements in Steam Engines.

inclined wheel (A, C,) continues to move in the aforesaid direction nearly parallel in one way to the primary shaft or axis (D, E,) and thereby obliges the inclined wheel (A, C,) and the primary axis (D, E,) to turn round or revolve on their centre until the highest or most distant part (A) of the said
5 oblique surface of the inclined wheel (A, C,) comes into contact with the said friction wheel (J), at which point or time the working beam (P, P,) or other moving part of the steam engine has moved the length of its stroke, and is disposed to return by the common or other machinery used for that purpose, and the inclined wheel or obliquely cut cylinder (A, B, C,) has made
10 one half of a revolution on its axis; and the rotative motion of the said inclined wheel (A, B, C,) is continued in the same direction through the other half revolution by means of the descent of the heavy arch (G) which was raised by the power of the steam engine at the same time with the friction wheel (J), and which during the returning motion of the working beam of the
15 steam engine acts upon the inclined wheel (A, C,) on the opposite side of the primary axis (D, E,) by means of a second friction wheel (H), which is carried by a double lever or carriage (G, F,) whose center of motion is at (K), and to the one end of which the heavy arch (G) or any other weight is attached or suspended, and the velocity which the matter of the wheel or cylinder (A, B, C,)
20 has acquired serves to continue its rotative motion past the points (A and C) where neither the steam engine nor the weight (G) have much action upon it, and when the point (C) has again come into contact with or has passed the friction wheel (J), the steam engine again commences its action, and the motion is continued as has been recited; and the mill-work or other machinery which
25 is required to be wrought by this machine is put in motion by the said primary axis, or by the oblique or inclined wheel, or by means of wheels connected with them in the usual manner. This method of producing a rotative motion by means of a friction wheel acting against the lateral surface of a wheel inclined to its axis, admits of many varieties in its mode of application, for
30 I fix the primary axis or shaft either perpendicular or horizontal, or at any other angle of inclination to the horizon which may be required, and I use one or more friction wheels, and I increase or diminish the angle of inclination of the oblique wheel to the primary axis, as the case may require. As therefore I cannot herein represent all those varieties, I have hereunto annexed a Drawing
35 or delineation and description of one of the best (which is applicable to the moving of corn and other similar mills), which Drawing is delineated in its true proportions, according to a scale of one-fourth of an inch for each foot of the real machine, being one forty-eighth part of the real size; but it must be

Watt's Improvements in Steam Engines.

remembered that I make the machines larger or lesser, and vary the proportions of their parts, as their uses may require. To shew the easiest method of connecting the said new machinery with the piston of the steam or fire engine, on whatever principle it may be otherwise constructed, I have delineated in red the piston and cylinder of a Newcomen's steam engine (as being the most 5 commonly used). And as the same mode of connection serves equally for all the four following methods herein described, I have not repeated the Drawing of the said steam engine, but have only delineated the parts which in these methods connect the new machinery with the old.

My second method of producing the aforesaid rotative motion consists in 10 applying the power of the steam engine to pull, push, or press a friction wheel or wheels against the external or internal circumference of a circular, oval, or double spiral wheel fixed upon an axis or shaft, in such manner that the said axis or shaft shall not pass through the center of the said circular, oval, or double spiral wheel, but shall be fixed nearer to one side of the circumference 15 than to the other, which, therefore, I denominate an excentric wheel, and the said action of the steam engine and of the said friction wheel or wheels upon or against the circumference of the said excentric wheel causes it to make one half of a revolution, and its motion is continued through the other half revolution by the descent of a weight fixed to or acting upon the said excentric wheel or its 20 shaft, or acting upon another excentric wheel (fixed to the same shaft) by means of a friction wheel or wheels. This second method also admits of several varieties in its application, of which I have hereunto annexed a delineation of two of the best, shewing the action of the steam engine on the external and also on the internal circumference of excentric wheels, which Drawings are 25 delineated and set forth according to their true proportions by a scale of one-fourth of an inch for each foot of their real size; but the said machines are also made larger or lesser, and the proportions of there parts varied according to the uses for which they are required. The excentric wheel whose external circumference is acted upon by the steam engine by means of friction wheels 30 is moved as follows (see the Drawing No. 2, Fig. 1st):—The steam engine pulls up the frame (H, D, L,) with the friction wheel (F, G,) against the external circumference of the excentric wheel A, B, which causes it to revolve on its axis towards D, until the point A of the excentric wheel comes to be in the middle between the points of contact of two friction wheels F, G, (with the 35 excentric wheel, and the point B has attained the summit of its motion, then the steam engine ceases to act, and the velocity acquired by the excentric wheel A, B, carries its point B beyond the summit, and the gravity of the

Watt's Improvements in Steam Engines.

unbalanced part of the excentric wheel, which is made equal to half the power of the steam engine, or greater or lesser as may be necessary, causes the excentric wheel to perform the other half revolution, by which motion it pulls down the frame H, D, L, and the end (J) of the steam engine's working beam, 5 and the point B having past its lowest place, the engine begins to act as before. The action of the steam engine on the internal circumference of an excentric wheel is described as follows:—When the engine pulls up the frame D, E, (see the annexed Drawing, No. 2, Fig. 3d,) with the friction wheel C, the latter is pressed against the internal circumference of the excentric wheel at 10 H, by which means the wheel is turned round half a revolution, and the point B becomes the vertex; then the engine ceases to act, and the weight of the wheel descending causes it to continue to revolve in the same direction, and compleats the revolution in like manner as has just been described.

My third method of producing the said rotative motion is by means of a 15 rod or rods D, B, (see the Drawing No. 3, Fig. 1st,) one end (D) of which is attached or suspended to the end of the working beam of the steam engine, and the other end (B) to any point of a wheel (A, E, B, F,) of a circular or any other form, which wheel is fixed at one end of a shaft or axis (C), so that by the revolution of the said wheel and the said axis (C), 20 the said latter point of fixture or attachment (B) shall describe a circle round the centre of the said axis, the diameter of which circle shall be equal to the extent of the stroke of the point of the engine's working beam, to which the end D is attached, and the said wheel (A, E, B, F,) is made so much heavier on one side (E, B, F,) of the centre than upon the other 25 side (A) that the said unbalanced weight (E, B, F,) shall have an action in its descent equal to one half of the power of the steam engine which works the machine, or more or less, as required; or, in place of putting the weight in the wheel (A, B, F,) itself, it is put upon a lever or other wheel, fixed to the said shaft (C, C,) in any other part, or is fixed in any other manner 30 which may serve to make the wheel continue its motion during the return of the piston of the steam engine; and this machine is used as follows:—When the point or pin (B) which connects the rod (D, B,) with the wheel is a little on either side of the lowest part of its revolution, the steam engine pulls the rod (D, B,) and thereby obliges the wheel to make one half of a 35 revolution, and the unbalanced weight (E, B, F,) of the wheel, or such other weight as acts upon it during the return of the steam engine, makes the wheel compleat its revolution, as has been already recited in the above methods. This third method also admits of several varieties in the mode of execution,

Watt's Improvements in Steam Engines.

for the wheel is sometimes placed so as to turn vertically (as in the Drawing), and sometimes to turn horizontally, and also at other inclinations to the horizon, and the balancing weight is also placed in various situations. I have therefore delineated only one of the most simple and perfect of these methods in the Drawing No. 3 hereunto annexed, which is laid down by the same scale with 5 the other Drawings of the preceding methods; but the size of the machine must be greater or lesser, and the proportions of its parts varied according to its use.

My fourth method of producing the aforesaid rotative motion consists in employing two steam engines to produce a rotative motion in one and the same 10 axis or shaft by any of the aforesaid three preceding methods, or by that which is herein-after described; and in applying these two steam engines in such manner that the second engine shall begin to act when the first engine has made the said shaft revolve upon its axis one-third part of a revolution or thereabouts, and consequently by the action of both the engines the shaft 15 makes two-third parts of a revolution, and its motion is continued through the remaining one-third part of the revolution, by the action of a weight properly placed, by which means the rotative motion is maintained in a more equal manner than can be done by a single steam engine. I also apply this method to move two separate or distinct shafts or axles, which are connected in their 20 action by wheel-work or otherwise, so that they both must revolve the same number of turns in the same time. As this fourth method must admit of many varieties in its application to any or all of the three preceding or the following methods, all which may be easily understood by explaining its application to one of them, I have only delineated in the Drawing No. 4 25 its application to the third method, as being the most simple, and I have laid down the said Drawing according to the same scale with the others. The motion of this machine is explained as under. The pin (G) of the connecting rod B, G, (see Drawing No. 4, Fig. 2d,) having past its lowest point, the working beam B ascends by the power of the steam engine to which it 30 belongs, and by its action on the pin G, through the rod B, G, causes both the wheels and their common axis to revolve until the end of the rod B, G, arrives at the point (C), at which time the end of the rod (A, C,) (which is attached to the further wheel) is arrived at the point K, (that is, a point of the further wheel directly behind K in this view,) and the centre of 35 gravity of the weight or heavy sides of the wheels G, J, C, has passed its vertex or highest part at F, and begins to descend towards K, the rod B, G, continues to act upon the wheels until it arrives at F, where it ceases to

Watt's Improvements in Steam Engines.

act, and the motion is continued only by the gravity of the heavy side of the wheels or by any other properly disposed weight, until the point C of the further wheel has past its lowest place and comes into the position directly behind G, when the steam engine belonging to the rod A, C, begins to act
 5 and continues the motion until it arrives again at C, when the revolution is completed and the rod B acts as before; the heavy sides of the wheels or any other weight used to continue the motion ought to be equal to one-half of the power of one of the engines, but may be greater or lesser as suits.

My fifth method of producing the aforesaid rotative motion delineated in
 10 the Drawing No. 5, hereunto annexed) is performed by means of a toothed wheel E (Fig. 1st), fixed upon the end of the shaft or axis F, which is to receive the rotative motion, which wheel E is acted upon and made to revolve by means of a second toothed wheel D, of an equal or greater or lesser diameter, which is firmly fixed to or connected with a rod A, B, (the other end
 15 of which is attached or hung to the working beam B, C, of the steam engine or is otherwise connected with the piston of the said engine,) in such manner that the said wheel D cannot turn round on its own axis or centre, and by means of a pin A, which is fixed to or in the centre of the wheel D, and enters into a groove or circular channell in the large wheel (G, G, or by any
 20 other proper means) the wheel D is confined, so that it cannot recede from the wheel E, but can revolve or turn round the wheel E without turning on its own axis or centre, and the motion is performed as follows:—The wheel D being nearly in the position of the prick't circle H, H, and so that its centre shall be a little towards either side of the perpendicular line passing through
 25 the centre F, the steam engine by means of the connecting rod B, A, pulls the wheel D upwards, and as its teeth are locked in the teeth of the wheel E, and it cannot turn on its own axis, it cannot rise upwards without causing the wheel E to turn round upon its axis F; when the wheel D is raised so high that its lower edge is come into contact with the upper edge of the wheel E,
 30 the engine has completed its stroke upwards, the piston of the engine is disposed to return, and the wheel continuing to turn round in virtue of the motion it had acquired, it carries the wheel D past the vertex or highest part, and the gravity of the wheel D, or of the connecting rod A, B, or of any other weight connected with them, causes the wheel D to descend on the
 35 other side of the wheel E, and thereby continues the motion it had imparted upon it, whereby the wheel D completes its revolution round E; and when the two wheels D and E have equal numbers of teeth, the wheel E makes two revolutions on its axis for each stroke of the engine; and in order that the

Watt's Improvements in Steam Engines.

said motion may be more regular, I fix to or upon the shaft or axis F, M, L, (Fig. 2d,) or to or upon some other wheel or shaft to which it gives motion, a heavy wheel or flyer to receive and continue the motion communicated to it by the primary movement.

And be it remembered, that in all cases where heavy wheels or swift motions 5 are not otherwise necessary to the uses to which any of the four preceding methods herein described may be applied, a flyer or heavy rotative motion should be applied to them to equalize their motion. In Fig. 3d & 4th, I have delineated the application of this method to a wheel C, C, fixed upon the primary axis, and having teeth upon its inside circumference which is acted upon by the 10 wheel E in the manner which has just been recited, but as the wheel E has only half the number of teeth that the wheel C, C, has, the wheel C, C, will make only one revolution for every two strokes of the engine. The Drawings of this fifth method are also delineated according to a scale of one-fourth of an inch for every foot of the real size of the machine. Fig. 1st and 2d 15 are adapted to a stroke of six feet long, and Fig. 3d and 4th to a stroke of three feet long; but I make the machines larger or lesser, and also make such variations in their structure as may serve to accommodate them to their use, as I alter the proportional diameters of the two wheels, and I place the primary axis either horizontally, perpendicularly, or inclined, and I make the wheels of 20 an elliptical, oval, or other form, and sometimes in place of the wheel D, I use a straight row of teeth or pins fix't to the connecting rod A, B, which take hold of the teeth of the said wheel E and cause it to revolve, some point of the connecting rod being guided by a pin moving in a groove, so as to keep the teeth or pins always engaged in the teeth of the wheel E, and also to keep 25 the teeth of the wheels always engaged in another; instead of the wheel G, G, and its groove, I use a strap of leather, or a link of iron, or other proper material (such as is drawn at J, K, which embraces the axis M or F, and the pin A, and connects them together and keeps them at their proper distance from each other, and I also make the two wheels E and D without any teeth, 30 but with rough surfaces, so that D turns E by the friction of their circumference alone.

Be it remembered, that though I have described all these motions as derived or produced from the motion of the end of the working beam of the steam engine, they may also be derived from the vibrating motion of any other 35 part of the steam or fire engine which is found convenient; the end of the working beam appears at present to be the best adapted for that purpose; any or all of these methods admit of the machines being moved with rotative

Watt's Improvements in Steam Engines.

motions in either direction, that is, either right-hand ways or left-hand ways about, according as the motion is commenced in either of these directions respectively.

In witness whereof, I have hereunto set my hand and seal, the Thirteenth
 5 day of February, in the year of our Lord One thousand seven hundred
 and eighty-two.

JAMES (L.S.) WATT.

Signed, sealed, and delivered (being first duly
 stamp), by the within-named James Watt,

10 in the presence of

N. BENNETT,
 Clerk to Mr. Davis,
 of Penryn.

15 BENJ. COLLETT,
 Servant to Mr. Davis.

AND BE IT REMEMBERED, that on the Thirteenth day of February,
 in the year of our Lord 1782, the aforesaid James Watt came before our said
 Lord the King in His Chancery, and acknowledged the Specification aforesaid,
 and all and every thing therein contained and specified, in form above written.
 20 And also the Specification aforesaid was stamp according to the tenor of the
 Statutes made in the sixth year of the reign of the late King and Queen
 W^m and Mary of England, and so forth, and in the seventeenth year of the
 reign of this Majesty King George the Third.

Inrolled the Twenty-third day of February, in the year of our Lord One
 25 thousand seven hundred and eighty-two.

LONDON:

Printed by GEORGE EDWARD EYRE and WILLIAM SPOTTISWOODE,
 Printers to the Queen's most Excellent Majesty. 1855.

DAVIS, Extra.

