

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Diseño y construcción de una maqueta de una máquina de vapor de pistón



Grado en Ingeniería Mecánica

Trabajo Fin de Grado

Autor: Mikel Erice Labiano

Directora: Sara Marcelino Sádaba

Codirectora: Marta Benito Amurrio

Pamplona, 10 de junio de 2022

Resumen

En el presente Trabajo Fin de Grado (TFG) se pretende diseñar una maqueta didáctica de una máquina de vapor de pistón y fabricar un prototipo funcional.

Se realiza el diseño de la maqueta utilizando el programa de CAD Solidworks. Posteriormente se realiza un prototipo funcional de la maqueta utilizando tecnología de impresión en 3d para fabricar algunas piezas. Otras piezas de la maqueta (piezas metálicas) se compran o son normalizadas, como tornillos o rodamientos. También algunas partes de la maqueta se fabrican con madera.

En el prototipo se pueden distinguir las diferentes partes y mecanismos de la máquina de vapor. Algunos componentes están seccionados para poder ver el interior. También se añade un accionamiento a la maqueta pudiendo ser este de tipo manual o eléctrico.

Lista de palabras clave

- Diseño
- Prototipo
- Mecanismo
- Maqueta
- Máquina de vapor
- Impresión 3D
- Didáctico
- CAD

ÍNDICE

ÍNDICE	2
ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABLAS	9
ÍNDICE DE ECUACIONES	10
MEMORIA	12
1 Introducción	14
1.1 Contexto histórico	14
1.2 Definición de la máquina de vapor	18
2 Planificación de las tareas a realizar	20
3 Objetivo y alcance	21
4 Estado del arte	22
4.1 Historia de las máquinas de vapor	22
4.2 Tipos máquinas de vapor	32
4.3 Aplicaciones máquinas de vapor	45
5 Componentes de una máquina de vapor de pistón y su funcionamiento. .	54
5.1 Caldera, (generador de vapor)	54
5.2 Válvula de distribución, (entrada y salida de vapor en el cilindro)	57
5.3 Cilindro, (transformación de presión en fuerza)	59
5.4 Biela-manivela, (transformación de movimiento alternativo en movimiento rotativo)	61
5.5 Volante de inercia, (almacenamiento de energía)	62
5.6 Eje o árbol de la máquina, (transferir movimiento)	63
5.7 Regulador, (limitar velocidad)	63
6 Diseño preliminar (Croquis de distribución del conjunto y mecanismos). .	65
7 Diseño de la maqueta y dimensionamiento de los componentes.	68
7.1 Diseño de los mecanismos	73
7.1.1 Biela-manivela	73
7.1.2 Biela-excéntrica	74
7.1.3 Polea del regulador centrífugo	77
7.1.4 Engranajes del regulador centrífugo	78
7.1.5 Regulador centrífugo	80
7.2 Materiales de la maqueta y uniones	83
7.3 Diseño del accionamiento	86
8 Proceso de fabricación del prototipo, materiales y herramientas empleadas.	87
9 Montaje y uniones	101
10 Presupuesto de fabricación del prototipo	105
11 Conclusiones	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Molino de grano tirado por burro (izquierda) . Carruaje (derecha) ... 14

Figura 2: Molino de viento típico de La Mancha (izquierda). Representación seccionada del molino (derecha) 15

Figura 3: Molino de agua (izquierda) . Serrería de Hierápolis, es la muestra más antigua del mecanismo biela-manivela (derecha) 15

Figura 4: Ejemplo de máquina de vapor en España, Real Taller Aserrío Mecánico (Valsaín, Segovia) 16

Figura 5: Ejemplo de máquina de vapor en España, máquina de vapor utilizada en la industria textil (parque fluvial del Llobregat, Barcelona) 17

Figura 6: Ejemplo de máquina de vapor en España, tren del Plazaola en la estación de Pamplona (1920) 17

Figura 7: Ilustración de una eolípila de Herón 23

Figura 8: Ilustración de la máquina de vapor de Jerónimo de Ayanz y Beaumont 24

Figura 9: Esquema de funcionamiento e ilustración de la máquina de vapor de Thomas Savery 25

Figura 10: Diagrama de la máquina de vapor de Thomas Newcomen. 26

Figura 11: Esquema de la máquina de Thomas Newcomen, entrada de vapor en el cilindro (izquierda), eyección de agua en el cilindro (derecha) 27

Figura 12: Dibujo básico de la Máquina de Watt (izquierda) y dibujo con elementos más detallados (derecha) 28

Figura 13: Mecanismo de movimiento rectilíneo que diseño Watt 29

Figura 14: Mecanismo de movimiento paralelo o paralelogramo de Watt 30

Figura 15: Dibujo del mecanismo engranaje sol y planeta. 30

Figura 16: Volante de inercia con el mecanismo engranaje sol y planeta 31

Figura 17: Regulador centrífugo que diseño Watt 32

Figura 18: Ciclos de funcionamiento de cilindros de simple y doble efecto 35

Figura 19: Máquinas de vapor de cilindro vertical 36

Figura 20: Máquinas de vapor de mesa (tienen la cruceta sobre el cilindro vertical y el cigüeñal debajo) 36

Figura 21: Máquina de vapor con cilindro en posición horizontal 37

Figura 22: Máquina de de vapor de cilindros oscilantes marina. 38

Figura 23: Ciclo de funcionamiento de pequeña máquina de vapor de simple efecto 38

Figura 24: Ilustración del funcionamiento de una máquina de vapor compuesta y una máquina de tres etapas seccionada 39

Figura 25: Válvula de corredera (izquierda) y válvula de pistón (derecha) 40

Figura 26: Cilindro de doble efecto con válvulas rotativas corliss. 40

Figura 27: Mecanismo de accionamiento de las válvulas rotativas corliss 41

Figura 28: Dibujo básico de funcionamiento de un motor uniflow (arriba) . Dibujo detallado del cilindro y las válvulas de asiento (abajo) 42

Figura 29: Regulador centrífugo que mueve una válvula lineal de asiento 43

Figura 30: Regulador de velocidad de inercia a baja velocidad (arriba) y a alta velocidad (abajo)	44
Figura 31: Sección de máquina de vapor de válvula central de alta velocidad, Willans	45
Figura 32: Diagrama de una bomba de agua de vapor de triple expansión	46
Figura 33: Bomba de agua de vapor de triple expansión en una estación de bombeo de agua	47
Figura 34: Ilustración de fábrica textil, donde se ve la zona del taller y la zona de la máquina de vapor	47
Figura 35: Generador eléctrico a vapor	48
Figura 36: Máquina semiportátil, como fuente de potencia para otra máquina (izquierda) . Burro de vapor, cabrestante utilizado en la industria maderera (derecha)	48
Figura 37: Triciclo de vapor (izquierda) y autobús de vapor (derecha).	49
Figura 38: Coche de vapor de 1923 (izquierda) y de 1975 (derecha).	49
Figura 39: Camión de vapor	49
Figura 40: Tractor de vapor (izquierda) y cosechadora de vapor (derecha) . .	50
Figura 41: Apisonadora de vapor (izquierda) y excavadora de vapor (derecha)	50
Figura 42: Grúa de vapor	51
Figura 43: Locomotora de vapor	51
Figura 44: Barco de vapor (RMS Titanic 1912)	52
Figura 45 Tanque de vapor (izquierda) y catapulta de vapor (derecha)	52
Figura 46: Diagrama de los componentes del avión a vapor (arriba) y foto del avión (abajo)	53
Figura 47: Esquema básico de una máquina térmica	54
Figura 48: Diagrama esquemático de una caldera de pirotubular.	55
Figura 49: Diagrama de la sección de una caldera de vapor, con el fogón a la derecha y parte de la caja de humos a la izquierda.	56
Figura 50: Corte de un fogón y de la caldera con soportes radiales	57
Figura 51: Esquema básico de válvula de distribución de pistón y cilindro	58
Figura 52: Pistón unido al vástago y camisa con lumbreras de un extremo de la válvula (arriba). Conjunto válvula de pistón con cruceta unida a la biela de la excéntrica (abajo).	59
Figura 53: Caja de distribución y cilindro (izquierda). Pistón y anillos de estanqueidad (derecha).	60
Figura 54: Cruceta (izquierda). Diagrama de transferencia de fuerzas con y sin cruceta (derecha)	61
Figura 55: Biela (izquierda). Manivela (derecha).	61
Figura 56: Máquina de vapor con volante de inercia de grandes dimensiones, "Corliss Centennial Engine", 1876	62
Figura 57: Eje con manivela	63
Figura 58: Regulador centrífugo trabajando a bajas revoluciones (arriba) y a altas revoluciones (abajo)	64
Figura 59: Croquis del perfil del Cilindro-Válvula (izquierda) y sección transversal del sistema de guías de la cruceta (derecha) [<i>Fuente: Elaboración propia</i>].	65

Figura 60: Croquis del regulador centrífugo con la polea y engranajes [Fuente: <i>Elaboración propia</i>].	66
Figura 61: Croquis de la distribución en planta de la máquina de vapor [Fuente: <i>Elaboración propia</i>].	67
Figura 62: Base de MDF.	68
Figura 63: Croquis con los diferentes subensamblajes: motor (rojo), eje máquina (verde) y regulador (azul).	68
Figura 64: Máquina anclada directamente al suelo.	69
Figura 65: Máquina anclada directamente sobre base de hormigón.	69
Figura 66: Máquina sobre bancada.	70
Figura 67: Tapas del lado de los vástagos de cilindro y válvula.	71
Figura 68: Diseño de la bancada y el soporte del regulador.	71
Figura 69: Cilindro-válvula de distribución (izquierda) y conducto de admisión (derecha) seccionados, corte en azul.	72
Figura 70: Secuencia de movimiento del mecanismo biela-manivela. En azul el pistón, la biela-sombrerete y la manivela.	73
Figura 71: Partes de la válvula de pistón	74
Figura 72: Dimensiones entre los conductos de la válvula.	75
Figura 73: Dimensiones seleccionadas para la válvula de pistón.	76
Figura 74: Distancia de la excéntrica.	77
Figura 75: Sistema de poleas que transmite el movimiento al regulador. Correa en azul.	77
Figura 76: Transmisión de engranajes del regulador (izquierda) y engranaje (derecha).	78
Figura 77: Configuración del engranaje seleccionado del Toolbox de Solidworks.	79
Figura 78: Vista frontal de regulador centrífugo diseñado (izquierda) y vista lateral de regulador con el sistema de barras que acciona la mariposa en azul (derecha).	80
Figura 79: Vista lateral del regulador centrífugo donde se aprecia la válvula de mariposa en azul.	80
Figura 80: Regulador centrífugo acotado	81
Figura 81: Detalle de fijación del volante de inercia y el eje (en azul).	84
Figura 82: Detalle de fijación de la polea del regulador y el eje (en azul), corte transversal del eje.	84
Figura 83: Detalle de fijación de diferentes elementos del regulador y los ejes (en azul), corte longitudinal de los ejes.	85
Figura 84: Manivela de accionamiento y empuñadura, en azul.	86
Figura 85: Base y listones de refuerzo.	87
Figura 86: Tacos de goma.	87
Figura 87: Soporte del regulador en el programa cortador "Eiger".	89
Figura 88: Fotos de la bancada durante la impresión. Puede apreciarse el material de soporte en las patas.	89
Figura 89: Piezas recién impresas con soportes (arriba) y limpias, sin soportes (abajo).	90
Figura 90: Impresora (Ender 5 Pro) utilizada para imprimir las piezas de PLA y rollos de filamento verde y blanco.	91
Figura 91: Detalle de la rejilla del relleno durante la impresión de la manivela.	92

Figura 92: Pieza hipotética original y datos del programa cortador.	93
Figura 93: Pieza hipotética con agujero de Ø 6 mm y datos del programa cortador.....	93
Figura 94: Pieza hipotética con radios y chaflanes de 5 mm y datos del programa cortador.....	94
Figura 95: Imágenes de la pieza Cilindro-Válvula en el programa cortador “Creality Slicer 1.2.3.”, abajo la pieza cortada en capas, los soportes en azul claro.	94
Figura 96: Ejemplos de piezas con estructura de soporte.	95
Figura 97: Herramientas utilizadas para la fabricación de la base y para el acabado de las piezas.	98
Figura 98: Dremel (arriba), brocas de Ø 2, 4.2 y 6.5 mm.	98
Figura 99: Piezas de madera de diferentes diámetros ya cortadas.	99
Figura 100: Barra hecha con alambre.	99
Figura 101: Válvula de mariposa fabricada con cartón.	99
Figura 102: Cordón utilizado para simular las juntas de estanqueidad.	100
Figura 103: Tornillo y brazo-contrapeso (izquierda). Brazo-contrapeso con tornillo (derecha).	100
Figura 104: Clavo utilizado para unir los listones a la base.	101
Figura 105: Tuerca y varilla roscada M5.	101
Figura 106: Cavidad hexagonal (izquierda) y agujeros roscados M5 (centro y derecha).	101
Figura 107: Biela con dos agujeros roscados M4.	102
Figura 108: Juego de machos de roscar M5, M4 y bandeador.	102
Figura 109: Diferentes tipos de tornillos y tuercas de M4 (izquierda). Destornillado de punta de cruz, plana, y llave allen utilizados para el montaje (derecha).	103
Figura 110: Vista frontal del prototipo ensamblado.	103
Figura 111: Vista trasera del prototipo ensamblado.	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Diagrama de Gantt de la planificación.	20
Tabla 2: Configuración de impresión de las piezas impresas en la UPNA.....	88
Tabla 3: Datos de configuración de las piezas impresas.	97
Tabla 4: Presupuesto.	105

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1	74
Ecuación 2	75
Ecuación 3	75
Ecuación 4	75
Ecuación 5	76
Ecuación 6	76
Ecuación 7	78
Ecuación 8	82
Ecuación 9	82
Ecuación 10	82
Ecuación 11	82

MEMORIA

1 Introducción

1.1 Contexto histórico

La revolución industrial o la primera revolución industrial fue un proceso de grandes cambios económicos, sociales, culturales y tecnológicos que tuvo lugar en Inglaterra entre 1760 y 1840. Más tarde se extendería por Europa y la América anglosajona. Supuso un gran avance en la historia de la humanidad ya que afectó a todos los ámbitos de la sociedad.

La máquina de vapor fue uno de los inventos más importantes de la época y el principal impulsor del desarrollo tecnológico de la primera revolución industrial. Permitted mecanizar la producción que antes se realizaba de forma artesanal en talleres. Se crearon las fábricas donde se utilizaba la máquina de vapor para suministrar el movimiento y la potencia necesaria para hacer funcionar las máquinas.

Antes de la máquina de vapor se utilizaban como fuentes de energía la tracción animal, la eólica, molinos de viento, y la hidráulica, molinos de agua, para mover las máquinas.



Figura 1: Molino de grano tirado por burro (izquierda) ^[1]. Carruaje (derecha) ^[2].



Figura 2: Molino de viento típico de La Mancha (izquierda). Representación seccionada del molino (derecha) ^[3].

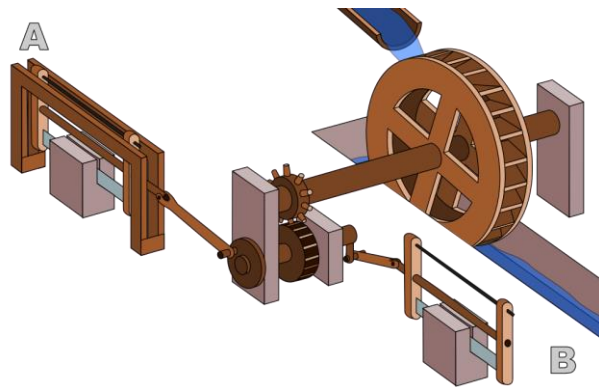


Figura 3: Molino de agua (izquierda) ^[4]. Serrería de Hierápolis, es la muestra más antigua del mecanismo biela-manivela (derecha) ^[5].

La mecanización de los procesos de manufactura aumento la producción y la productividad. También la máquina de vapor permitió grandes avances en el transporte con la creación del ferrocarril y los barcos propulsados con máquinas de vapor.

Las consecuencias principales de la revolución industrial fueron las siguientes:

- Aumento de la producción mecanizada.
- Expansión económica e industrial.
- Aumento de la productividad, gracias al desarrollo tecnológico.
- Grandes mejoras en los medios de transporte.
- Desplazamiento de población, aumentando en áreas urbanas y disminuyendo en las zonas rurales.
- Transición del sector primario al sector secundario. Especialmente en los sectores textil y metalúrgico.
- Impulso del carbón como fuente principal de energía.

Los inventos más destacables de la revolución industrial fueron los siguientes:

- Máquina de hiladora (1767).
- Máquina de vapor (James Watt patentada en 1769).
- Barco de vapor (1787).
- Ferrocarril (1814).
- Bicicleta (1817).
- Máquina de escribir (1829).

En España la tecnología de la máquina de vapor también se usó en la industria y el transporte. En las siguientes imágenes se muestran algunos ejemplos (figura 4, 5 y 6).



Figura 4: Ejemplo de máquina de vapor en España, Real Taller Aserrío Mecánico (Valsaín, Segovia) ^[6].



Figura 5: Ejemplo de máquina de vapor en España, máquina de vapor utilizada en la industria textil (parque fluvial del Llobregat, Barcelona) ^[7].



Figura 6: Ejemplo de máquina de vapor en España, tren del Plazaola en la estación de Pamplona (1920) ^[8].

Actualmente, el uso de las máquinas de vapor es muy limitado, ya que el motor eléctrico y el de combustión interna las han sustituido en muchas aplicaciones.

Tras la primera revolución industrial se dieron otras que también han producido importantes cambios tecnológicos.

- Primera Revolución Industrial (1760-1840). Mecanización
Máquina de vapor, energía hidráulica y mecanización.
- Segunda Revolución Industrial (1850-1914). Electricidad
Producción en masa, cadena de montaje y electricidad.
- Tercera Revolución Industrial (1950-s.XXI). Informática
Automatización, tecnologías de la información y la comunicación (TIC).
- Cuarta Revolución Industrial (2011-actualidad). Digitalización
Internet de las cosas, coordinación digital, sistemas ciberfísicos y robótica ^[9].

1.2 Definición de la máquina de vapor

Según la Real Academia Española (RAE), se define máquina como:

1. f. Artificio para aprovechar, dirigir o regular la acción de una fuerza.
2. f. Conjunto de aparatos combinados para recibir cierta forma de energía y transformarla en otra más adecuada, o para producir un efecto determinado.
4. f. por antonom. Locomotora del tren.

En el mismo apartado también define máquina de vapor.

máquina de vapor

1. f. máquina que funciona por la fuerza expansiva del vapor de agua ^[10].

Aunque el termino máquina de vapor se suele asociar con la locomotora de los trenes o con los motores de vapor de pistón, existen diferentes tipos de máquinas de vapor y dispositivos que usan vapor sin tener mecanismos.

En este trabajo se comentarán los diferentes tipos de máquinas de vapor, centrándose en la máquina de vapor de pistón (motor de vapor) de uso industrial, utilizado en las fábricas para proporcionar movimiento y potencia.

2 Planificación de las tareas a realizar

Se realiza una planificación del TFG mediante un diagrama de Gantt. En él se exponen las diferentes tareas a realizar y los plazos estimados.

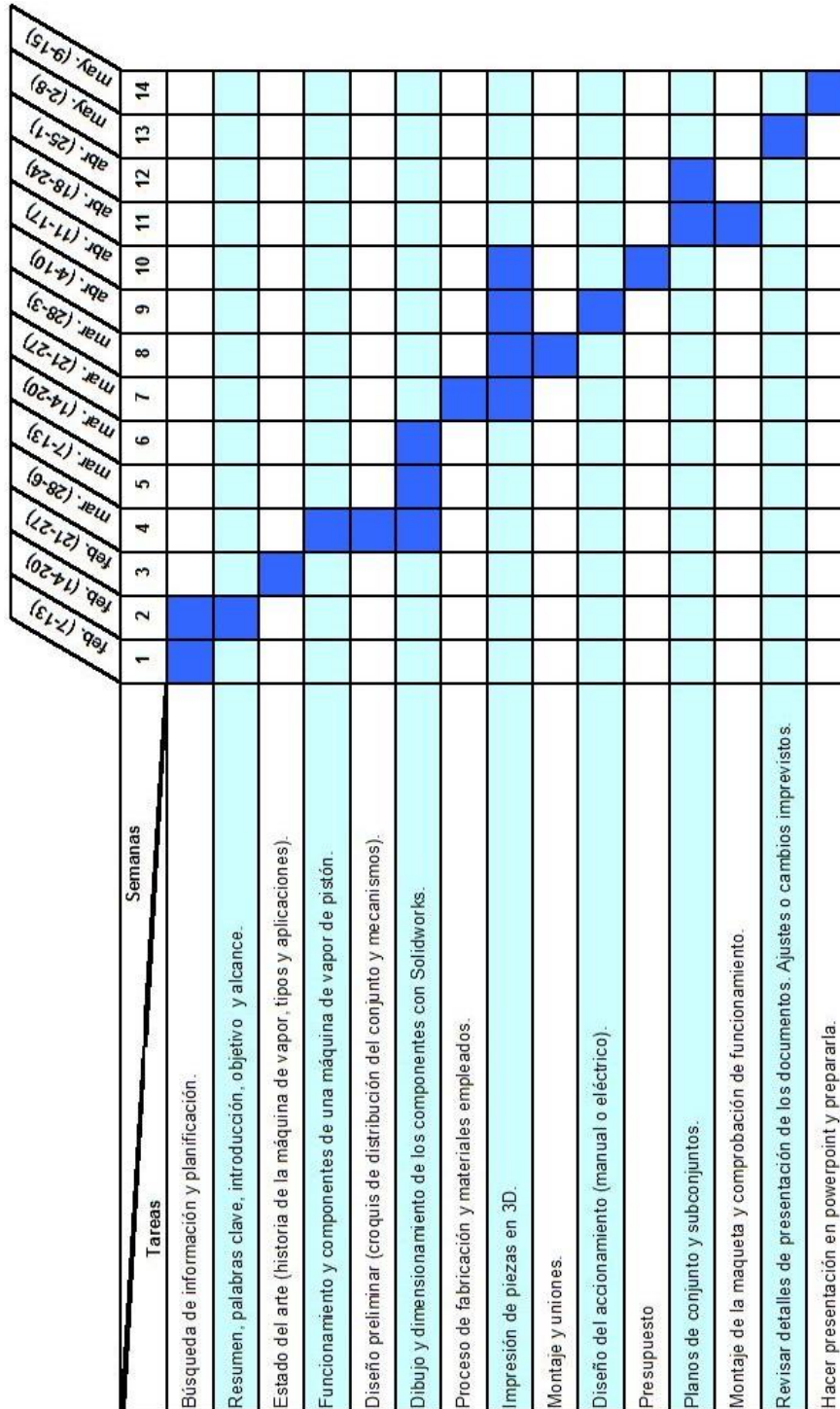


Tabla 1: Diagrama de Gantt de la planificación.

3 Objetivo y alcance

El objetivo del TFG es diseñar y construir una maqueta de una máquina de vapor de pistón. En la maqueta deberán ser visibles los diferentes mecanismos y partes de la máquina. Los mecanismos se podrán mover mediante un accionamiento eléctrico o manual. Las partes principales de la máquina son: la caldera, la bancada o los soportes, la guía del pistón, el cilindro, la válvula de pistón, el eje principal, el volante de inercia, el regulador centrífugo, la válvula de regulación, el eje de salida y los soportes del eje de salida.

Se utilizará tecnología de impresión en 3d para fabricar las piezas de plástico, madera para la base y elementos metálicos como varillas o tornillos para uniones y para transmitir movimiento.

4 Estado del arte

A continuación se detalla los aspectos más importantes de la historia de las máquinas de vapor, sus diferentes tipos y sus aplicaciones.

4.1 Historia de las máquinas de vapor

La primera máquina de vapor fue la eolípila, creada por el matemático e ingeniero griego Herón de Alejandría en el siglo I.

El dispositivo esta formado por dos grandes piezas. En la parte inferior hay semiesfera cubierta por la parte superior que sirve como hervidor de agua. Esta semiesfera tiene una apertura para llenarla de agua y esta elevada del suelo por tres patas. De la cubierta superior salen dos tubos conectados a una esfera que a su vez sirven de eje de rotación de la esfera. Esta esfera tiene dos tubos de salida con forma de L, situados en lados puestos.

Se coloca una fuente de calor bajo el hervidor, calentando el agua hasta producir vapor. El vapor asciende por los tubos que salen de la semiesfera hasta la esfera superior y sale a presión por tubos con forma de L de la esfera al exterior. Esto produce la rotación de la esfera a causa de la tercera ley de Newton (acción-reacción), por tanto la salida del vapor a presión produce un empuje de forma similar al de los motores de los cohetes. Esta máquina no tubo ninguna utilidad practica, solo fue un dispositivo experimental.



Figura 7: Ilustración de una eolípila de Herón ^[11].

Hasta el siglo XVII no se comenzó a utilizar de forma práctica el vapor en máquinas o dispositivos. La primera patente (privilegio de invención) de la que se tiene constancia es la del ingeniero Español Jerónimo de Ayanz y Beaumont en 1606. Una máquina de vapor que servía para el desagüe de las minas de plata de Guadalcanal.

La máquina esta compuesta por un depósito esférico donde se genera vapor y otros dos depósitos donde actúa el vapor. Estos están conectados con el depósito esférico y con el exterior mediante tuberías.

Con una fuente de calor bajo el depósito esférico y llenado este con agua, se genera vapor. Este se dirige a los depósitos de agua abriendo la válvula que corresponde a cada depósito. Cuando el vapor a presión entra en los depósitos de agua, este se expande empujando el agua a través de una tubería hacia el exterior de la mina. Abriendo y cerrando las válvulas de los depósitos de forma alterna se consigue el bombeo de agua más o menos continuo.

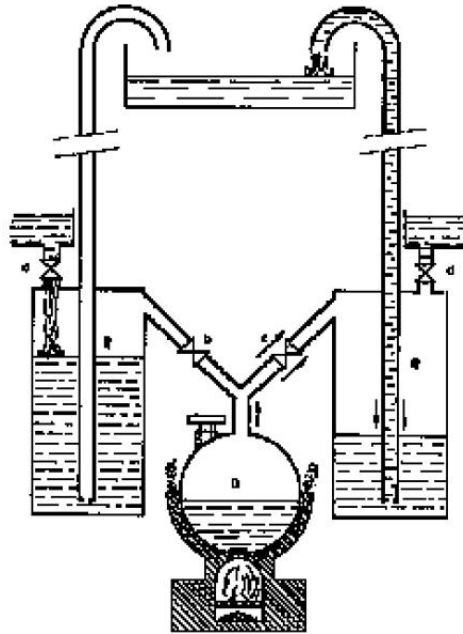


Figura 8: Ilustración de la máquina de vapor de Jerónimo de Ayaz y Beaumont [12].

Años más tarde, en 1698, el ingeniero inglés Thomas Savery, patentó una máquina de funcionamiento más o menos similar a la máquina de Jerónimo de Ayaz y Beaumont, y que realizaba la misma función, extraer el agua de las minas.

La máquina estaba formada por una caldera y dos depósitos. Estos estaban conectados con la caldera y con una tubería por donde se hacía circular el agua.

Como se puede ver en el esquema de la figura 9, el funcionamiento de la máquina de Thomas Savery es el siguiente. Calentando agua en la caldera se generaba vapor con el que se llenaba un depósito. Una vez lleno, se cerraba la válvula (a) por la que accedía el vapor al depósito y se abría la válvula (b) que conectaba la tubería con el agua de la mina. Se rociaba el exterior del depósito con agua abriendo la válvula (d), enfriando el vapor provocando su condensación y succionando así el agua de la mina. Cuando se llenaba el depósito de agua se cerraba las válvulas (b) y (d). Posteriormente se abrían las válvulas (a) y (c). El vapor a presión entraba en el depósito desplazando el agua de este por la tubería hacia el exterior. Este ciclo se repetía de forma alterna con el otro depósito para provocar un bombeo de agua más o menos constante.

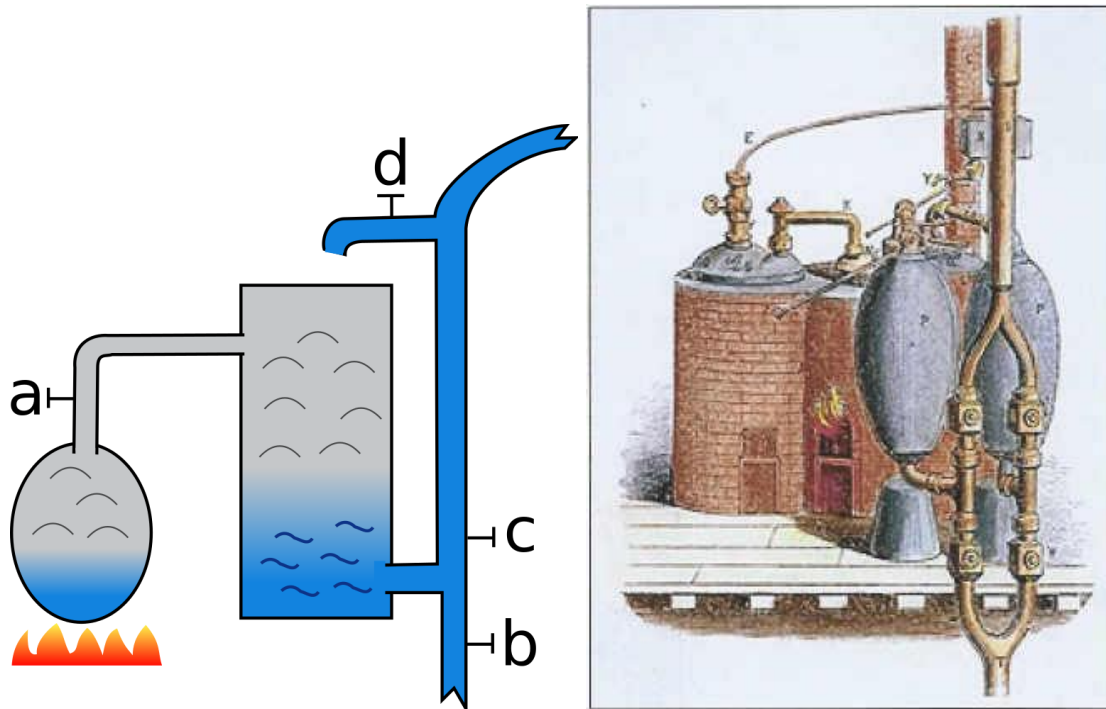


Figura 9: Esquema de funcionamiento e ilustración de la máquina de vapor de Thomas Savery ^[13].

Este diseño de máquina de vapor o bomba de agua presentaba cuatro problemas serios. El primero, cada vez que se llenaba el depósito se desperdiciaba calor calentando el agua que era bombeada. El segundo, cuando el vapor a presión empujaba el agua al exterior se producían grandes presiones en el depósito, rompiendo en muchos casos las uniones soldadas, necesitando estas reparaciones frecuentes. El tercero, aunque esta bomba usaba presión de vapor positiva para empujar el agua hacia arriba (sin límite teórico de altura a la que una sola bomba de alta presión podía empujar el agua), en la práctica y por seguridad, se necesitaba una un conjunto de bombas a diferentes niveles para trabajar con presiones seguras en minas profundas. El cuarto, cuando el vapor de depósito condensaba y se generaba vacío, el agua era empujada hacia el depósito por la presión atmosférica, limitando la altura del nivel de agua que se quería aspirar a unos 9-10m.

La patente original de la máquina de vapor de Thomas Savery de 1698 tenía validez por 14 años, que se extendió en 1699 a 21 años más por una ley que aprobó el parlamento inglés, conocida como "Fire Engine Act". La patente de Thomas Savery cubría todas las bombas que elevaban agua utilizando fuego, lo que dificultó el desarrollo de máquinas de vapor en las islas británicas.

Esto obligó a otro ingeniero inglés (Thomas Newcomen) a asociarse con él para poder trabajar en el desarrollo de máquinas de vapor. En 1712 Thomas Newcomen inventó un motor de vapor que se componía de una caldera donde se producía vapor, un cilindro abierto por la parte superior con un pistón justo encima de la caldera, un pequeño depósito con agua, una barra con un peso unido al embolo de la bomba de agua y un balancín o viga oscilante unido a la barra y al pistón de la máquina por cadenas. Al usar cadenas la fuerza se realiza únicamente por tracción.

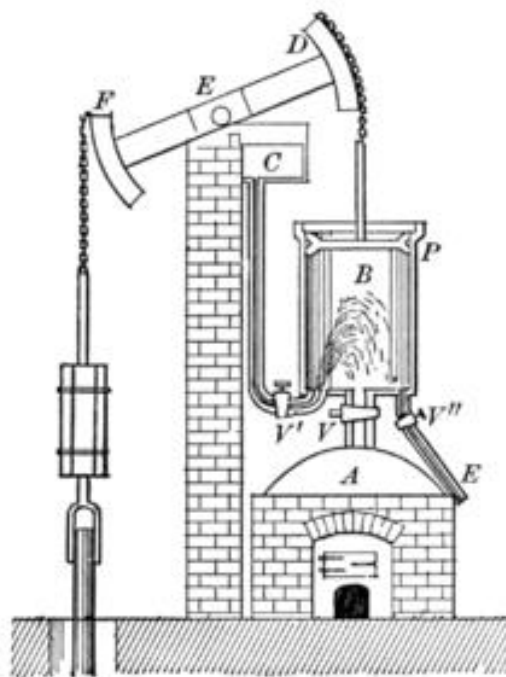


Figura 10: Diagrama de la máquina de vapor de Thomas Newcomen.

Como se ve en la figura 11, el funcionamiento de la máquina es el siguiente. Se calienta agua en una caldera que produce vapor. Se abre una válvula que permite el paso de vapor a la parte inferior del cilindro. Este se llena de vapor porque la barra con el peso que acciona la bomba de agua hace girar el balancín desplazando el pistón de la máquina hacia arriba. Cuando el pistón alcanza el punto superior la válvula de la caldera se cierra y se inyecta una pequeña cantidad de agua, procedente del depósito pequeño de agua, en el cilindro. El vapor en el interior del cilindro se condensa generando vacío y por acción de la presión atmosférica exterior el pistón desciende realizando el trabajo de bombeo.

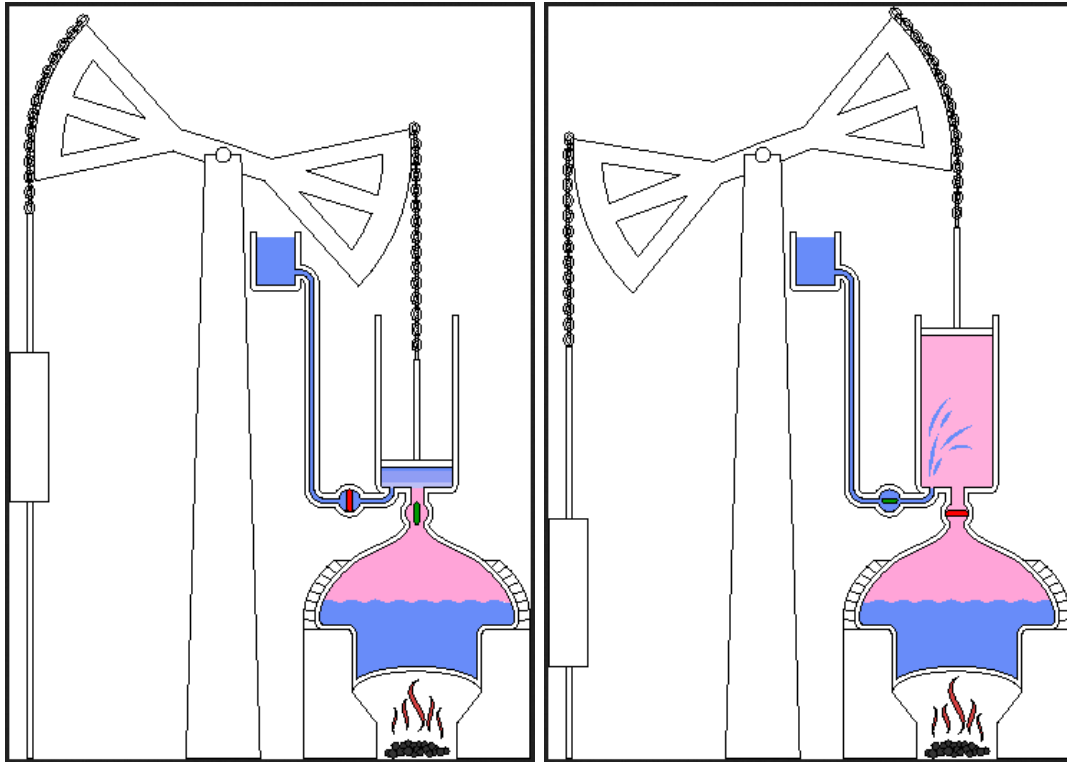


Figura 11: Esquema de la máquina de Thomas Newcomen, entrada de vapor en el cilindro (izquierda), eyección de agua en el cilindro (derecha) ^[14].

Esta máquina aunque se la conoce como máquina de vapor, realmente el vapor no realiza el trabajo, por eso, también se la conoce como máquina atmosférica, ya que es la presión atmosférica la que empuja el pistón hacia abajo. Se decidió usar este diseño de máquina porque el vapor en la caldera no alcanza presiones elevadas y por tanto su funcionamiento es más seguro. A pesar de su baja eficiencia y de que trabajaba de forma muy lenta la máquina tuvo éxito comercial, ya que había una alta demanda de bombas de agua para las minas. Esta máquina también presentaba el mismo problema que la de Thomas Savery, el cilindro que se llena de vapor se calienta y se enfría constantemente, dando como resultado frecuentes averías y roturas en las uniones soldadas.

En 1765 James Watt, un ingeniero escocés, tuvo que reparar en su taller una máquina de vapor Newcomen. Watt se percató de la ineficiencia de la máquina y la mejoró añadiendo un condensador separado del cilindro. Esto aumentó considerablemente la eficiencia de la máquina.

El primer diseño de Watt era una máquina similar a de Newcomen con la diferencia de tener un condensador separado. Cuando el pistón alcanzaba el punto superior del cilindro se abría una válvula que permitía el paso de vapor del cilindro al condensador. El vapor se condensaba en el condensador manteniendo el cilindro caliente.

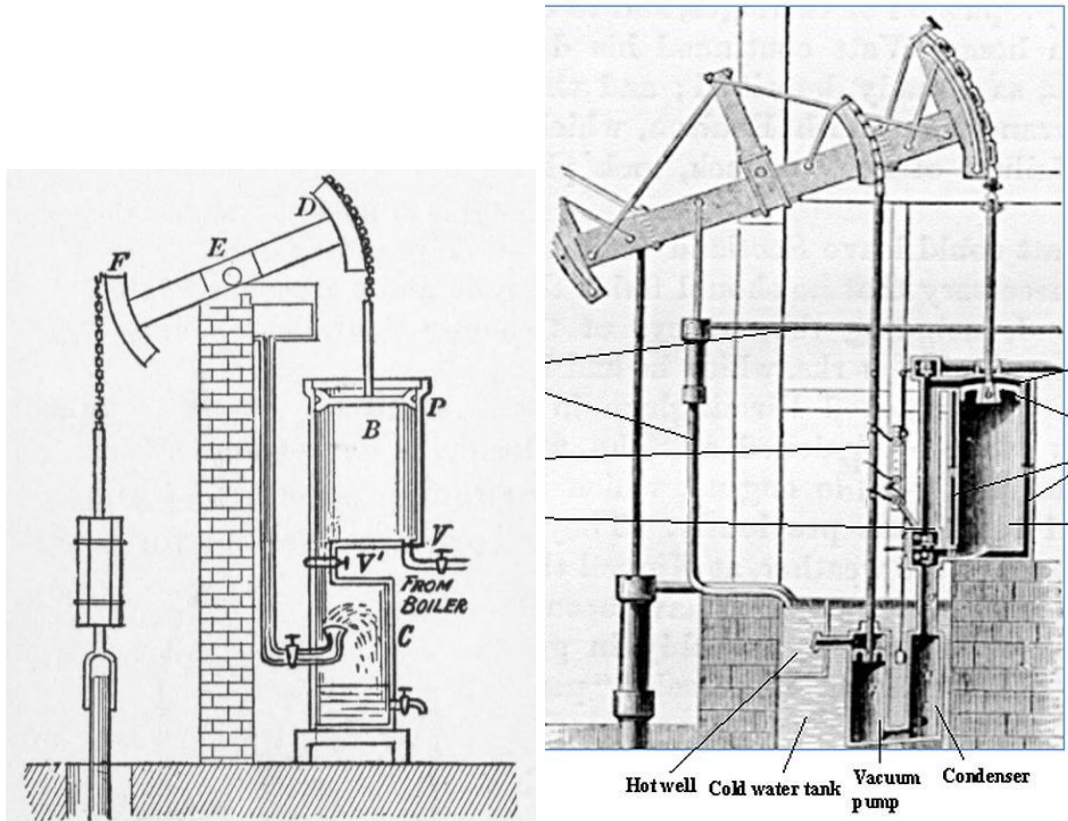


Figura 12: Dibujo básico de la Máquina de Watt (izquierda) y dibujo con elementos más detallados (derecha) ^[15].

Otras mejoras de Watt que aplicó al diseño de Newcomen fue sellar la parte superior del cilindro y rodearlo con una camisa. El vapor pasaba a través de la camisa antes de entrar en la parte baja del cilindro, manteniendo el pistón y el cilindro calientes para evitar la condensación en el interior de este.

También lo fue la utilización de vapor a baja presión para empujar el pistón desde el lado superior al mismo tiempo que se producía vacío por la condensación en lado inferior. Esto aumentó la eficiencia del motor, pero también creó un par variable en el eje que no era deseable para muchas aplicaciones, en concreto, el bombeo de agua.

Impulsar las máquinas utilizando vapor a baja presión en un lado del pistón y un vacío parcial por condensación en el otro plantea la posibilidad de desarrollar motores alternativos. El diseño de una válvula con movimiento alternativo podría dejar pasar vapor a baja presión en el cilindro y luego conectarse con el condensador de forma alterna. Como consecuencia, el sentido de la carrera que realiza potencia podría invertirse, mejorando la producción de un movimiento rotativo. Esto dio como resultado motores con cilindro de doble efecto, con una mayor eficiencia, mayor velocidad (mayor potencia) y un movimiento más regular.

Antes del desarrollo del cilindro de doble efecto, la unión entre la viga y el vástago del pistón se realizaba con una cadena, y por lo tanto solo podía producir potencia en un sentido, tirando. Esto era efectivo en las máquinas de vapor destinadas a bombear agua, pero con un cilindro de doble efecto era necesaria la capacidad de tirar y empujar. Otro aspecto era la imposibilidad de unir directamente la viga con el vástago del cilindro, porque mientras el vástago se movía verticalmente en línea recta, el extremo de la viga giraba respecto del eje describiendo un arco. Para solucionar este problema, Watt desarrolló un mecanismo de cuatro barras para producir un movimiento rectilíneo. Con este mecanismo se consigue que un punto de una barra describa una trayectoria casi recta.

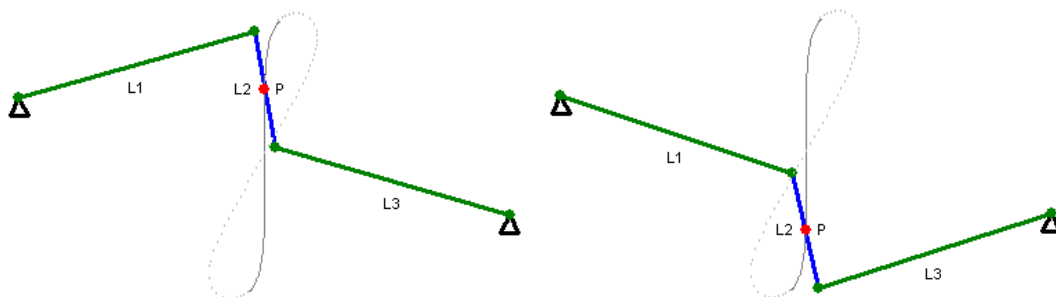


Figura 13: Mecanismo de movimiento rectilíneo que diseñó Watt ^[16].

Posteriormente modificó el mecanismo inicial para hacerlo más compacto añadiendo más barras, creando el mecanismo de movimiento paralelo o paralelogramo de Watt.

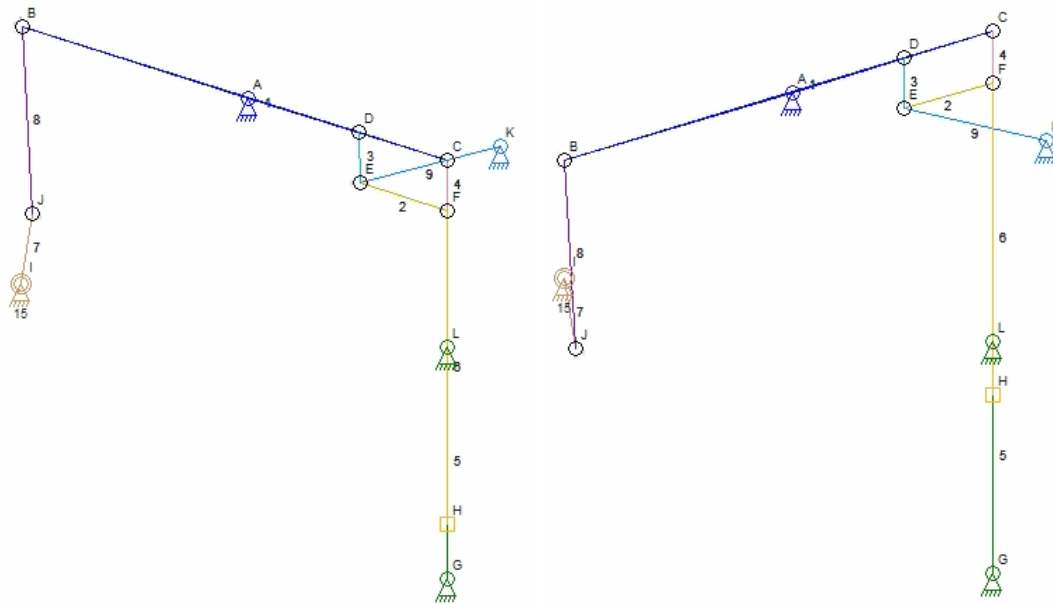


Figura 14: Mecanismo de movimiento paralelo o paralelogramo de Watt [17].

Teniendo la viga unida con el cilindro de doble efecto, que podía ejercer fuerza de forma alternativa en ambos sentidos, era posible convertir el movimiento oscilatorio del extremo de la viga en movimiento rotativo para hacer girar un eje. El mecanismo más fácil para convertir un movimiento alternativo en un giro es el mecanismo de biela-manivela. Pero Watt no podía usarlo porque este mecanismo estaba patentado por el inventor inglés James Pickard, quien modificó una máquina Newcomen para producir movimiento giratorio.

Watt patentó un mecanismo “engranaje sol y planeta” para transformar el movimiento alternativo en rotativo. Este mecanismo fue utilizado en sus máquinas hasta que expiraron los derechos de la patente de James Pickard, y fue entonces cuando instaló el mecanismo biela-manivela en sus máquinas de vapor.

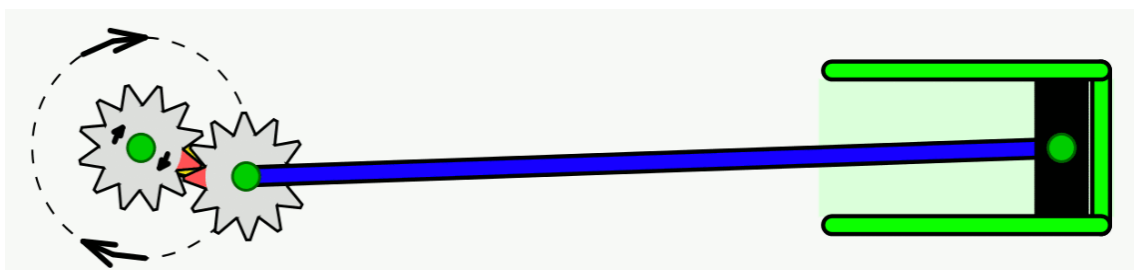


Figura 15: Dibujo del mecanismo engranaje sol y planeta.

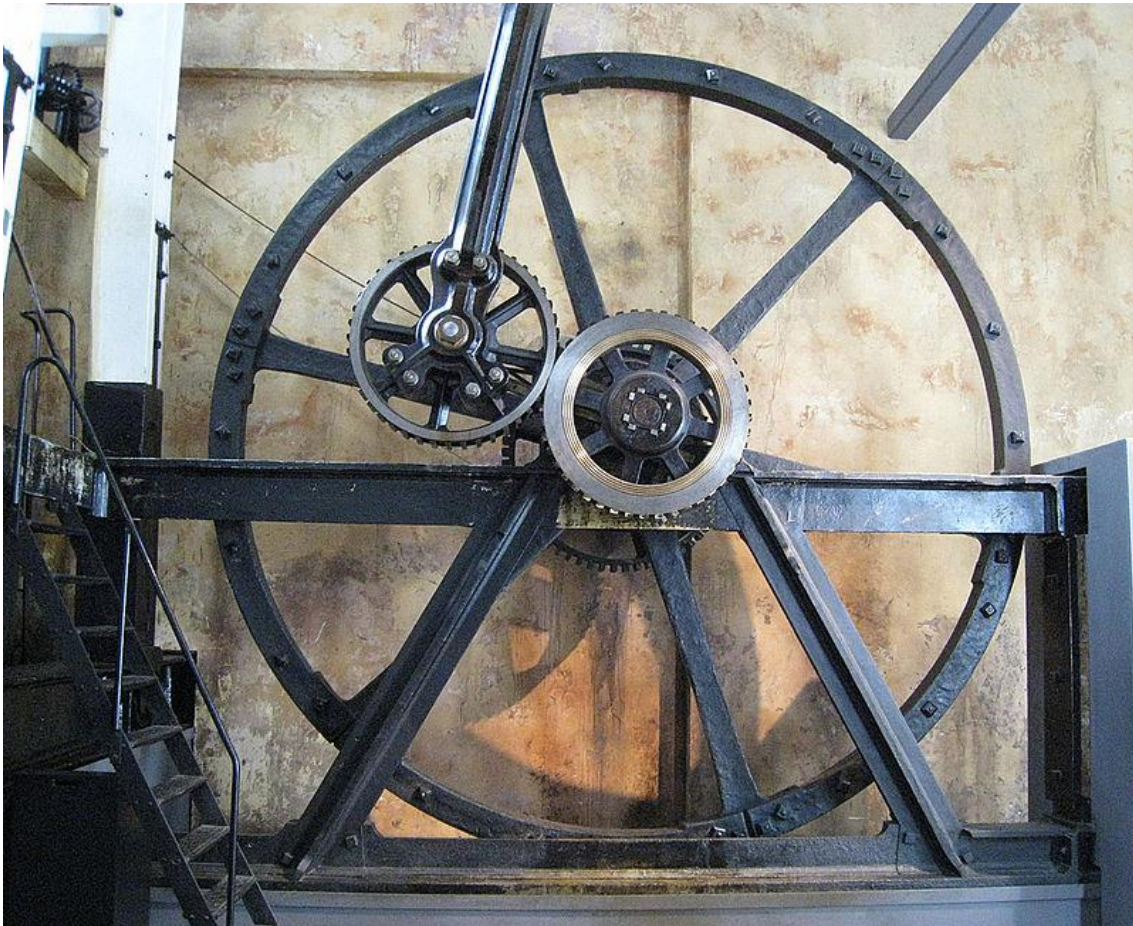


Figura 16: Volante de inercia con el mecanismo engranaje sol y planeta ^[18].

Para mantener la potencia constante y suavizar el movimiento alterno, las máquinas disponían de un volante de inercia en el eje. El movimiento de salida se realizaba con una polea o engranajes que podían estar unidos al eje o ser parte del volante de inercia.

Ya que con una máquina de vapor se movían varias máquinas en las fábricas, se requería una velocidad constante en el eje de salida de la máquina de vapor. Watt adaptó un regulador centrífugo, que se usaba para controlar la velocidad de los molinos de viento, y lo unió a una válvula reguladora de vapor. Este sistema relacionaba el número de revoluciones con la cantidad de vapor que entraba en el cilindro, manteniendo así una velocidad constante.

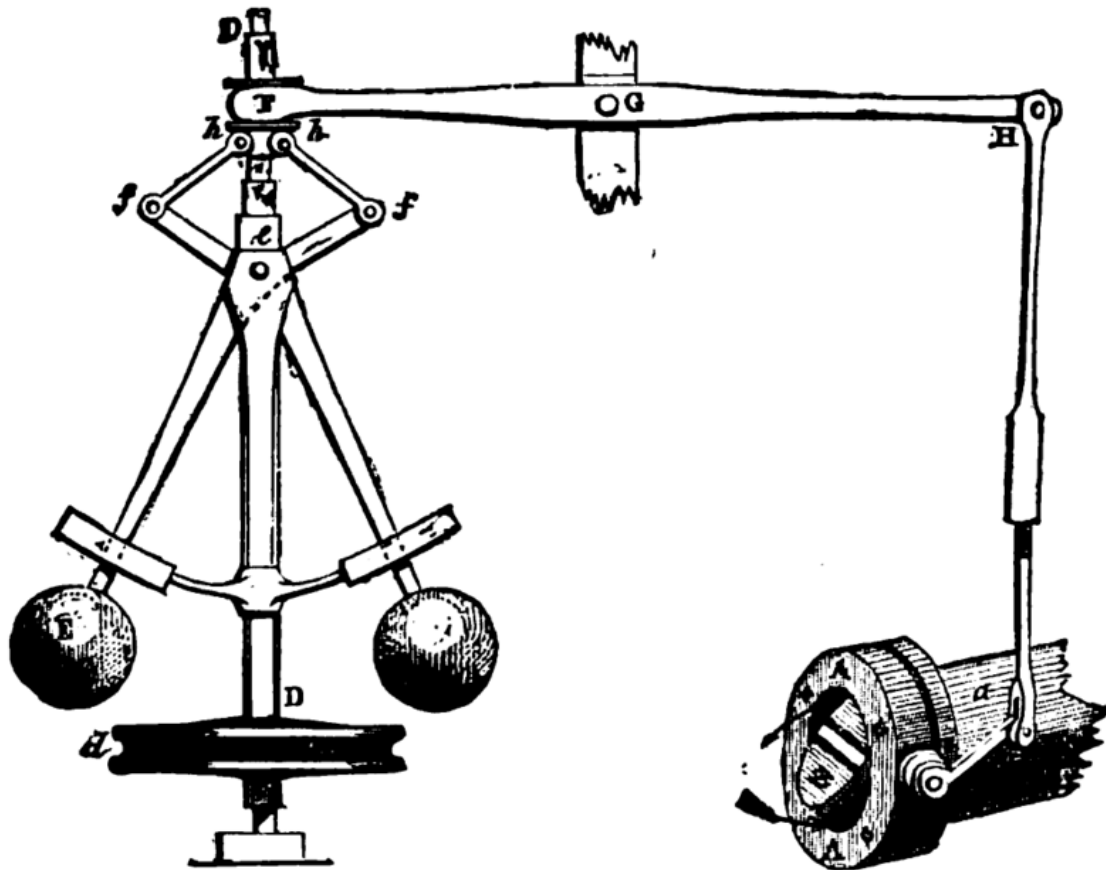


Figura 17: Regulador centrífugo que diseñó Watt ^[19].

Tras las mejoras notables de James Watt las máquinas de vapor fueron mejoradas y se utilizaron en diferentes aplicaciones. En 1889 el ingeniero británico Charles Parsons inventó la turbina de vapor.

Con el uso de la energía eléctrica y los motores de combustión interna, las máquinas de vapor de cilindro dejaron de usarse de forma general. Hoy existen pocas máquinas de vapor en funcionamiento, algunas se conservan en museos y algunas locomotoras son usadas con fines turísticos.

4.2 Tipos máquinas de vapor

A lo largo del desarrollo de las máquinas de vapor se crearon diferentes tipos de máquinas. Existen diferentes tipos según las mejoras que se crearon, las diferentes formas de funcionamiento y las aplicaciones donde se utilizaron.

➤ Clasificación según la forma de funcionamiento:

- **Sin cilindro (bombas de agua):** La presión del vapor empuja el agua o el vacío producido por la condensación del vapor aspira el agua. Están formadas por depósitos, tuberías y válvulas de paso. Estas fueron las primeras máquinas de vapor que se utilizaron, como la de Jerónimo de Ayanz y Beaumont y la de Thomas Savery.
- **Con cilindro:** Funcionan desplazando un pistón dentro de un cilindro. El pistón mediante un mecanismo realiza un movimiento alternativo rectilíneo o un giro. Están formadas por un cilindro con un pistón, válvulas y mecanismos adicionales. También pueden o no tener condensador. Estas fueron las máquinas de vapor más utilizadas, como la de Thomas Newcomen, la de James Watt y otros modelos similares.
- **Turbina:** El vapor a presión mueve una turbina por acción (impulsión) o por reacción. Están formadas por un eje con la turbina y una carcasa. Estas fueron las turbinas de Charles Parsons y los desarrollos posteriores hasta la actualidad.
- **Empuje por reacción (cohete):** Un chorro de vapor a alta velocidad sale de una tobera o boquilla produciendo una fuerza de reacción. Generalmente se refiere a los motores cohete de vapor. También es el caso de la eolípila de Herón, aunque en muchas ocasiones se menciona la eolípila como una turbina, realmente son dos “cohetes” que proporcionan rotación a la esfera de la parte superior.

➤ Clasificación según la fuerza de accionamiento:

- **Presión atmosférica:** En estas máquinas la condensación del vapor produce vacío y es la presión atmosférica la que ejerce la acción. Estas fueron las máquinas de Thomas Savery, en la fase de aspiración de agua, y la de Thomas Newcomen.

- **Presión de vapor:** En estas máquinas es la presión de vapor la que ejerce la acción. Estas fueron las máquinas de Jerónimo de Ayanz y Beaumont, la de Thomas Savery, en la fase de empuje de agua, la de Watt y todos los desarrollos posteriores. También lo son las turbinas de vapor y los cohetes de vapor.
- Clasificación según si tenían condensador o no:
- **Sin condensador:** En estas máquinas una vez que el vapor ha empujado el pistón, este sale del cilindro directamente a la atmósfera. Estas máquinas eran las de Newcomen y algunas máquinas de vapor, que por simplificar la instalación se construían sin condensador, como las utilizadas en el transporte terrestre.
 - **Con condensador:** En estas máquinas el vapor a presión empuja el pistón y sale por un conducto a un condensador. El vapor pasa en el condensador de fase gaseosa a líquida, generando un vacío que ayuda al funcionamiento de la máquina. Estas máquinas son más complejas pero también más eficientes. Estas eran, generalmente, las máquinas utilizadas de forma estacionaria, en transporte marítimo y en algunos casos las máquinas utilizadas para el transporte terrestre.
- Clasificación según el número de carrera de trabajo:
- **Simple efecto:** El vapor entra al cilindro y empuja el pistón solo por una cara, realizando una carrera de trabajo en cada ciclo. Estas eran las máquinas de Newcomen.

- **Doble efecto:** El vapor entra al cilindro y empuja el pistón por un lado, realizando una carrera de trabajo. Al final de la carrera el vapor entra al cilindro y empuja el pistón por el otro lado. En total se realizan dos carreras de trabajo por ciclo. Este tipo de máquinas produce el doble de potencia que las de simple efecto. Estas eran las máquinas de Watt y la mayoría de las máquinas desarrolladas posteriormente.

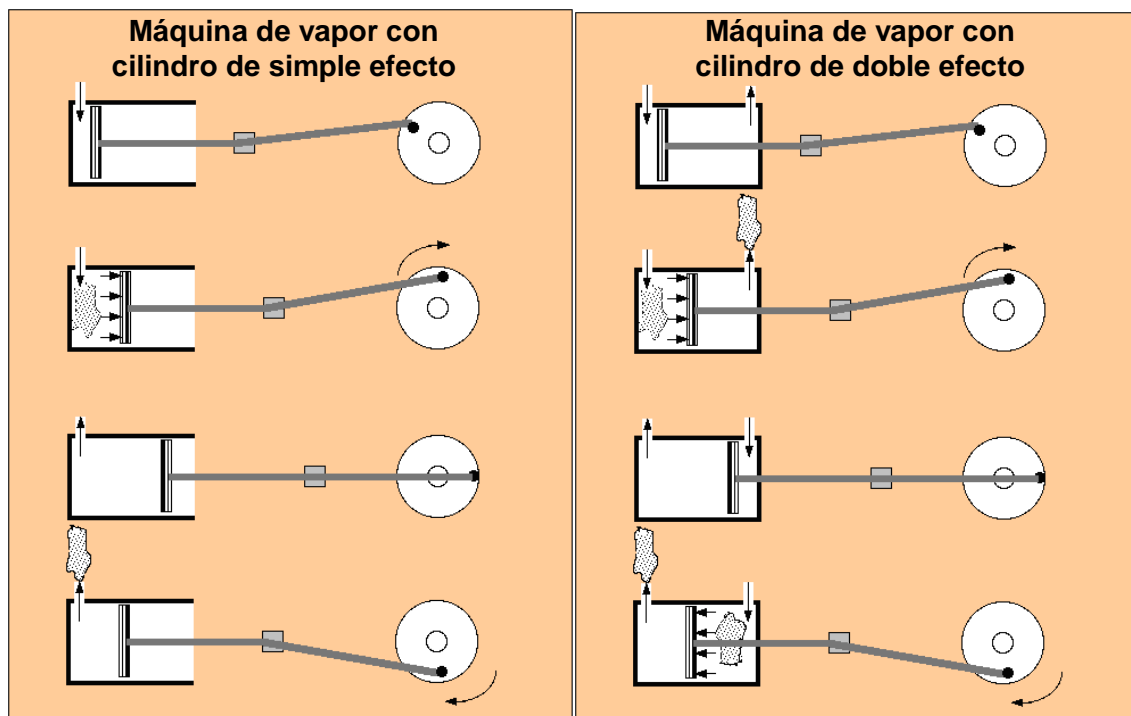


Figura 18: Ciclos de funcionamiento de cilindros de simple y doble efecto [20].

➤ Clasificación según la disposición de los cilindros y el cigüeñal:

- **Cilindros en vertical:** Estas son las que tienen los cilindros en posición vertical. Estas eran las máquinas de balancín, como la de Newcomen o la de Watt. También las máquinas de vapor de mesa. Este tipo de máquinas trabajaba a bajas velocidades pero eran más compactas. Esta disposición también se utilizó en motores marinos y para generadores eléctricos.

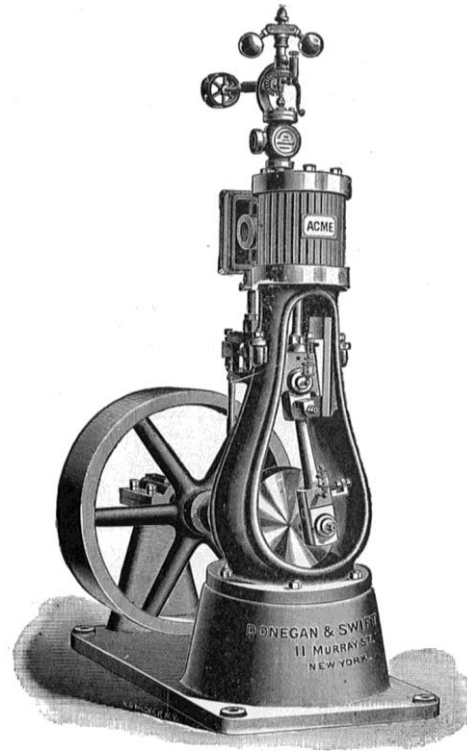


Figura 19: Máquinas de vapor de cilindro vertical [21].

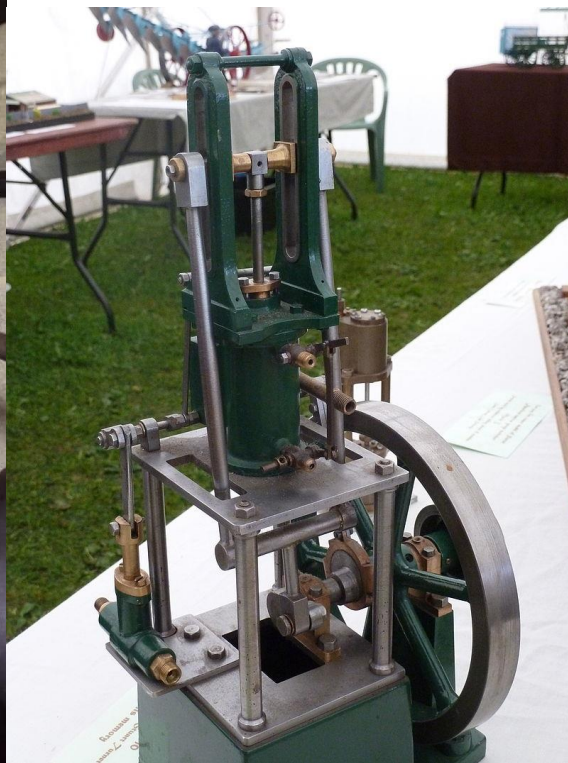


Figura 20: Máquinas de vapor de mesa (tienen la cruceta sobre el cilindro vertical y el cigüeñal debajo) [22].

- **Cilindros en horizontal:** Estas son las que tienen los cilindros en posición horizontal. Estas se utilizaron tanto en máquinas estacionarias como de transporte. Ocupaban más superficie en planta pero alcanzaban mayores velocidades, ya que tenían menos componentes mecánicos, como el balancín o las barras del mecanismo paralelo de Watt.

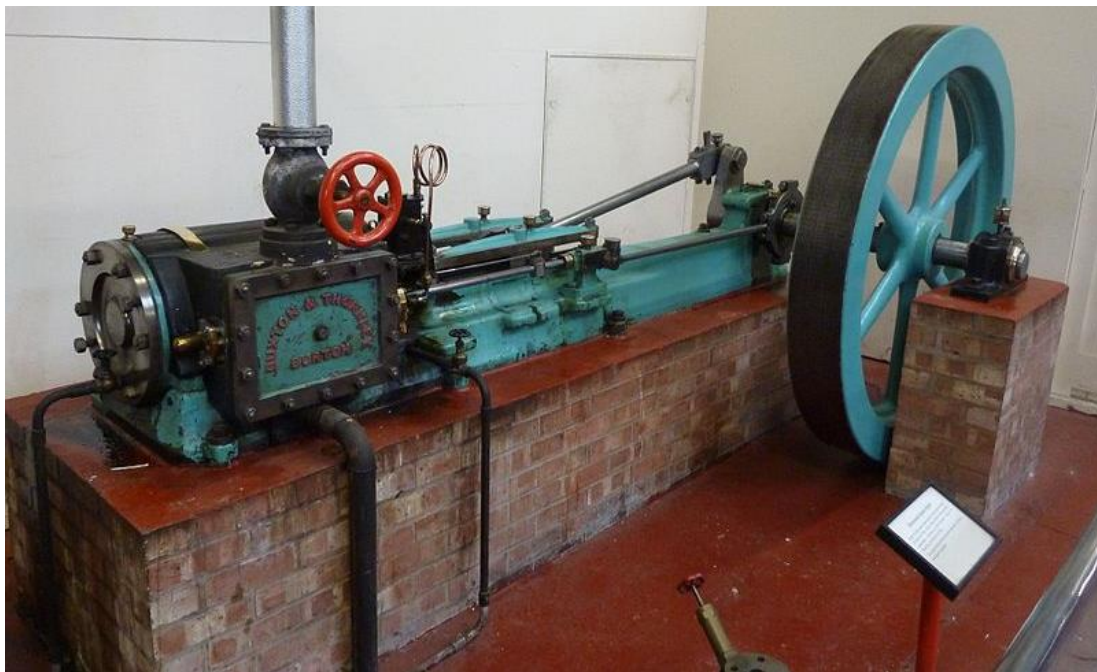


Figura 21: Máquina de vapor con cilindro en posición horizontal [23].

- **Cilindros oscilantes:** Estas máquinas presentan un diseño simple. El vástago del pistón esta conectado directamente a la manivela, es decir, el vástago actúa también como biela. El cilindro tiene en la cara exterior dos muñones sobre los que oscila el cilindro. Las máquinas integran el conducto de entrada y salida de vapor en los muñones del cilindro y mediante un mecanismo de barras y una excéntrica se mueve la corredera de la válvula deslizante. Otro tipo de máquinas, generalmente pequeñas, no tiene válvula de distribución. Al oscilar el cilindro las lumbreras de este por donde entra y sale el vapor se alinean con el conducto de entrada y de salida. Este tipo de máquinas se utilizaron principalmente en barcos y como pequeñas máquinas estacionarias. Eran sencillos, compactos y con bajos costos de fabricación.

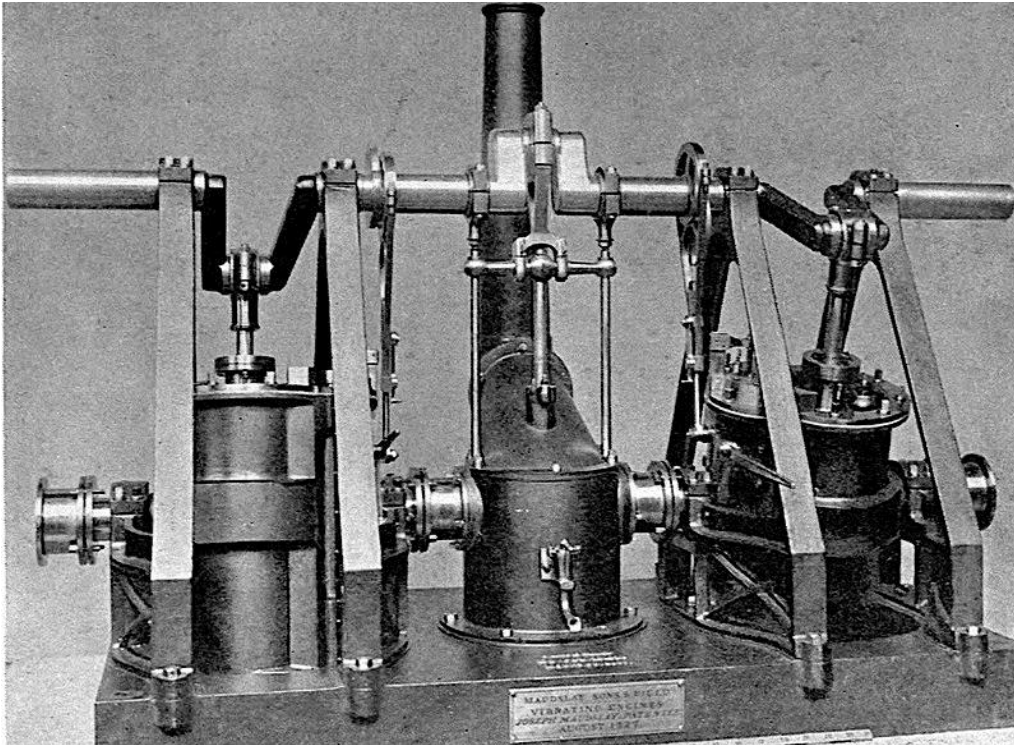


Figura 22: Máquina de de vapor de cilindros oscilantes marina.

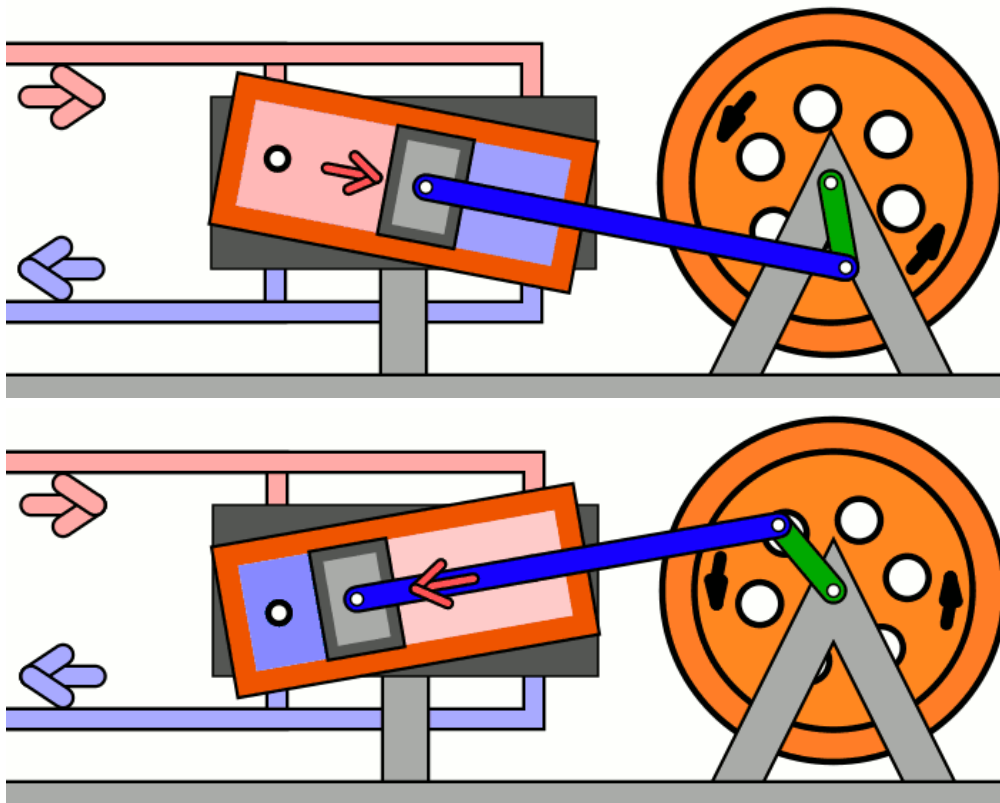


Figura 23: Ciclo de funcionamiento de pequeña máquina de vapor de simple efecto ^[24].

➤ Clasificación según las fases de expansión del vapor:

- **Simples:** Son las máquinas de vapor donde solo se realiza trabajo en una única fase de expansión del vapor, es decir, entra al cilindro, empuja el pistón y sale a la atmosfera o va a un condensador.
- **Compuestas:** Son las máquinas de vapor donde se realiza trabajo en varias fases de expansión, es decir, el vapor entra en el cilindro, empuja el pistón y cuando sale, entra a otro cilindro. Estas máquinas tienen dos o más cilindros y aprovechan mejor la expansión del vapor.

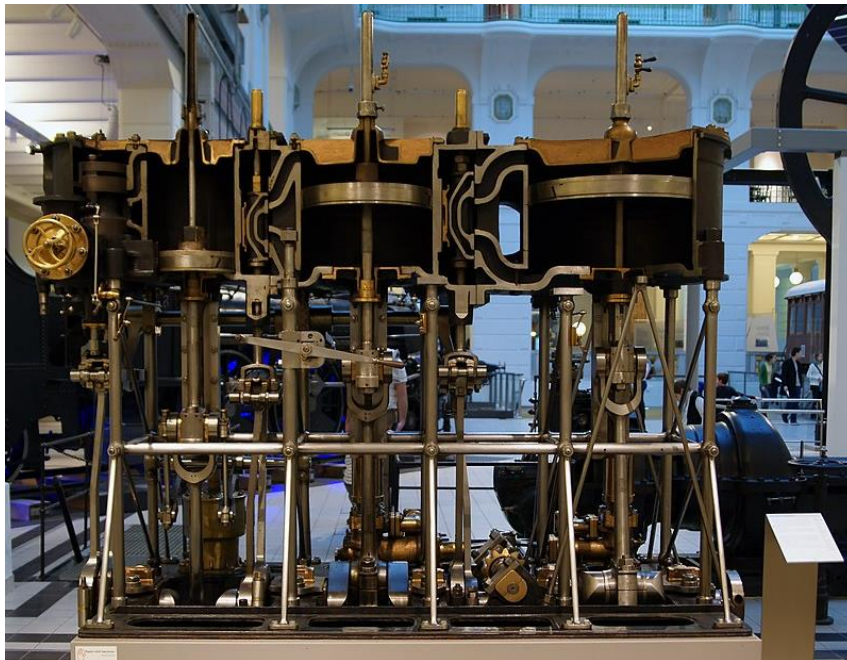
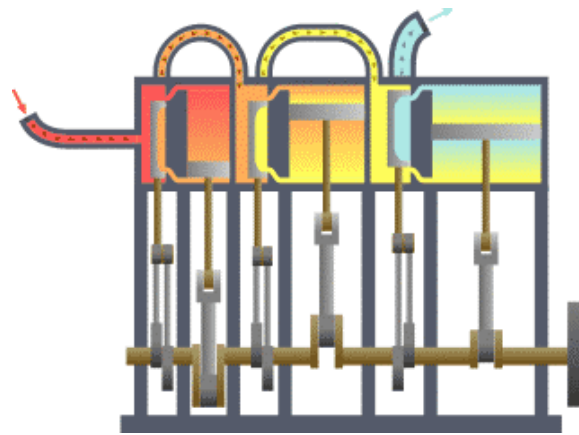


Figura 24: Ilustración del funcionamiento de una máquina de vapor compuesta y una máquina de tres etapas seccionada ^[25].

➤ Clasificación según tipo de válvulas:

- **Deslizantes (corredera o pistón):** Las de tipo corredera fueron las primeras que se utilizaron en máquinas de vapor, pero fueron sustituidas por las válvulas de pistón, ya que estas mejoraban la eficiencia y porque las válvulas de corredera tenían problemas de lubricación cuando trabajaban con vapor sobrecalentado.

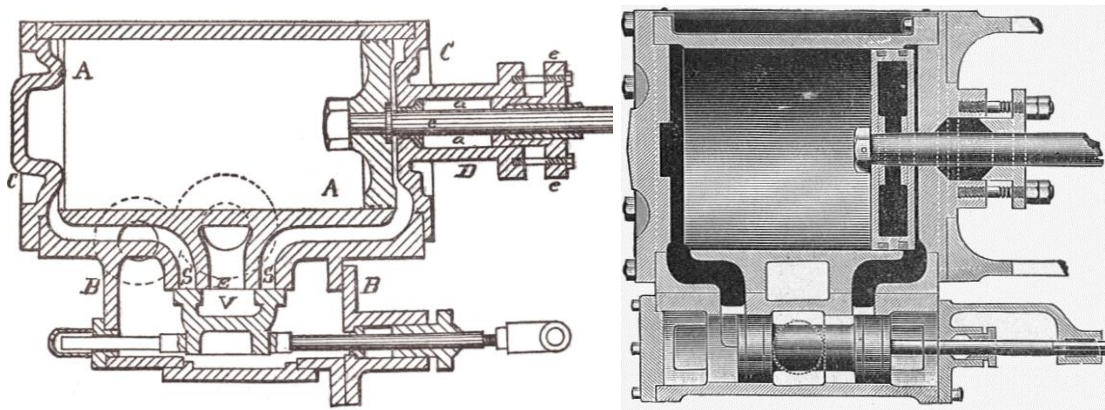


Figura 25: Válvula de corredera (izquierda) y válvula de pistón (derecha) [26].

- **Corliss:** El sistema de válvulas corliss, inventado por el ingeniero estadounidense George Henry Corliss, consta de 4 válvulas rotativas y de sincronización variable. Esto hacía que el motor corliss tuviera una gran eficiencia térmica, mejor que cualquier otro tipo de máquina de vapor, hasta que se inventaron las máquinas de flujo unidireccional y las turbinas de vapor. Se utilizaron principalmente para aplicaciones estacionarias, para movimiento de maquinaria en fábricas y para generación de electricidad.

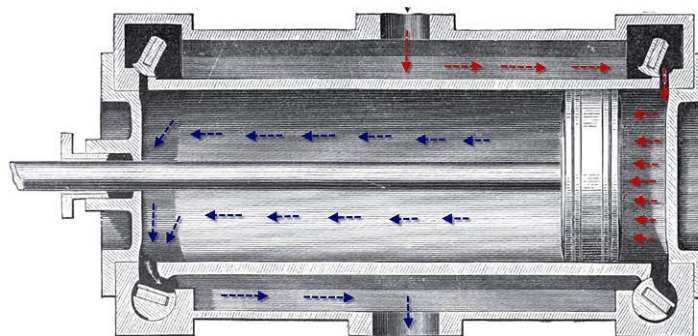


Figura 26: Cilindro de doble efecto con válvulas rotativas corliss.

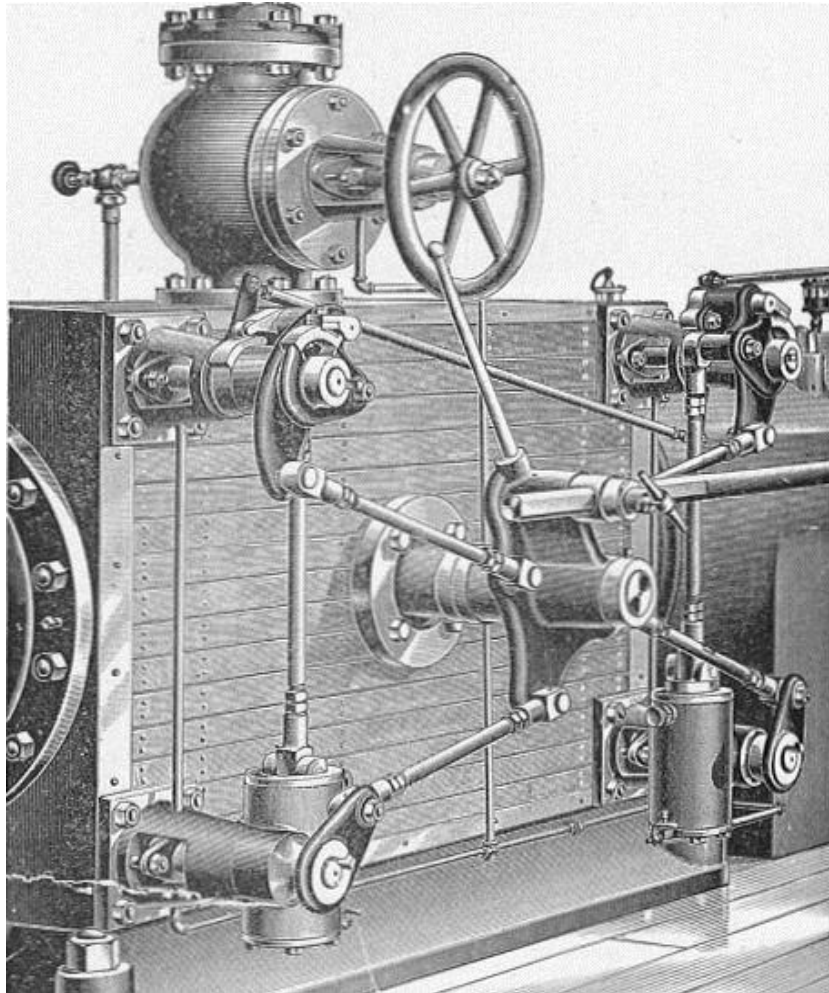


Figura 27: Mecanismo de accionamiento de las válvulas rotativas corliss ^[27].

- **Válvulas de asiento:** Las válvulas de asiento consisten en un tapón cónico que cierra una apertura circular. Fueron utilizadas en los motores de balancín de Watt y también se utilizaron posteriormente en las máquinas de flujo único o unidireccional (uniflow), donde eran controladas por un árbol de levas. Las válvulas de admisión estaban colocadas una a cada lado del cilindro, y el escape de vapor se producía por unas lumbreras situadas en el centro del cilindro. Teniendo así un flujo de vapor con una entrada y una salida en diferentes zonas del cilindro, manteniendo un gradiente térmico estacionario y consiguiendo así una mejor eficiencia térmica. Este tipo de motores funcionaban a altas velocidades, lo que los hacía muy útiles para generación de electricidad.

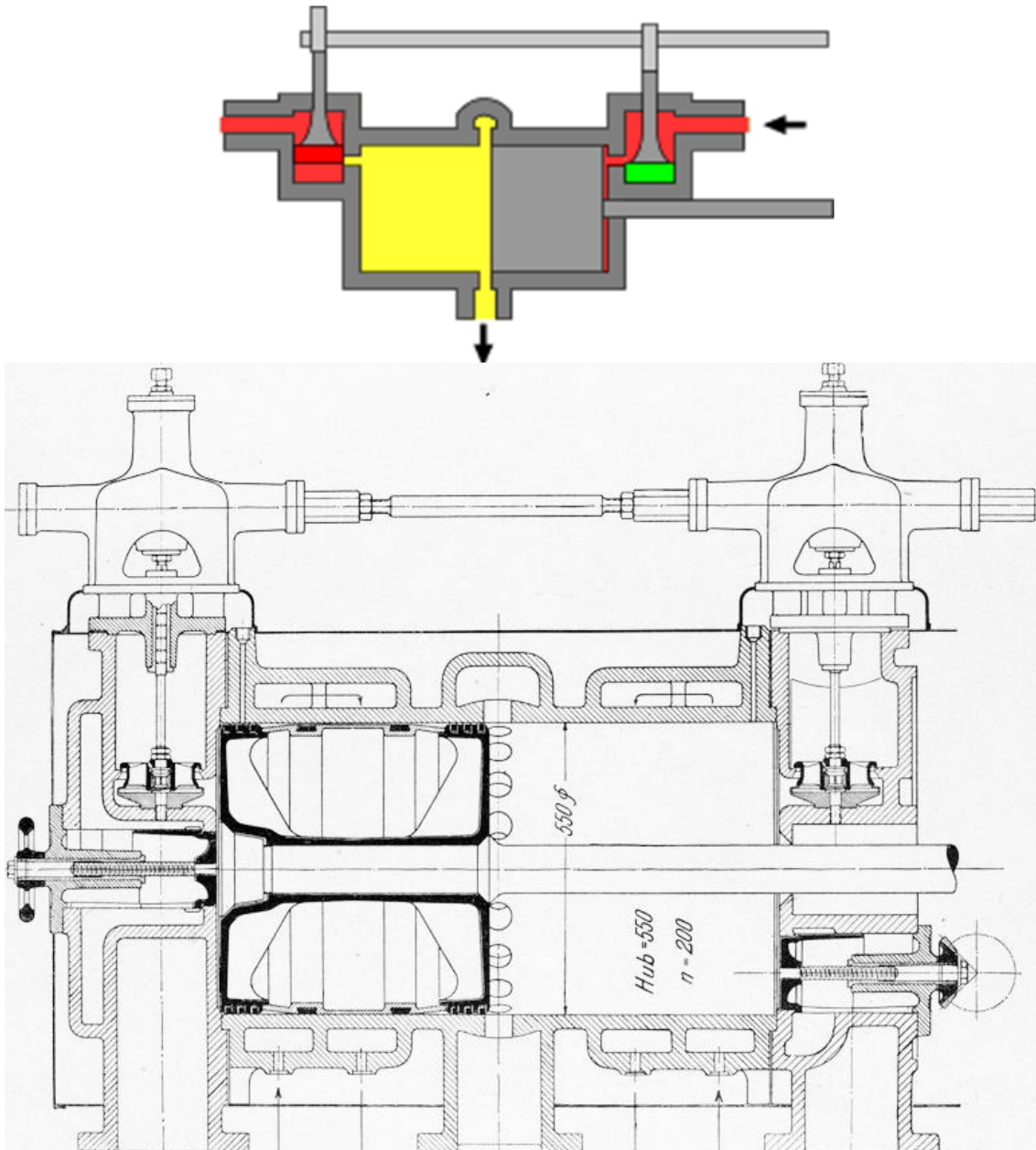


Figura 28: Dibujo básico de funcionamiento de un motor uniflow (arriba) ^[28]. Dibujo detallado del cilindro y las válvulas de asiento (abajo) ^[29].

➤ Clasificación según tipo de control:

- **Acelerador:** Eran los máquinas que controlaban la velocidad regulando el paso de vapor de forma manual mediante una válvula lineal (de tornillo) o rotativa (de mariposa).

- **Corte automático:** Eran las máquinas que controlaban (limitaban) la velocidad de forma automática, mediante un regulador de tipo centrífugo o de inercia, relacionado el número de revoluciones con el paso de vapor.

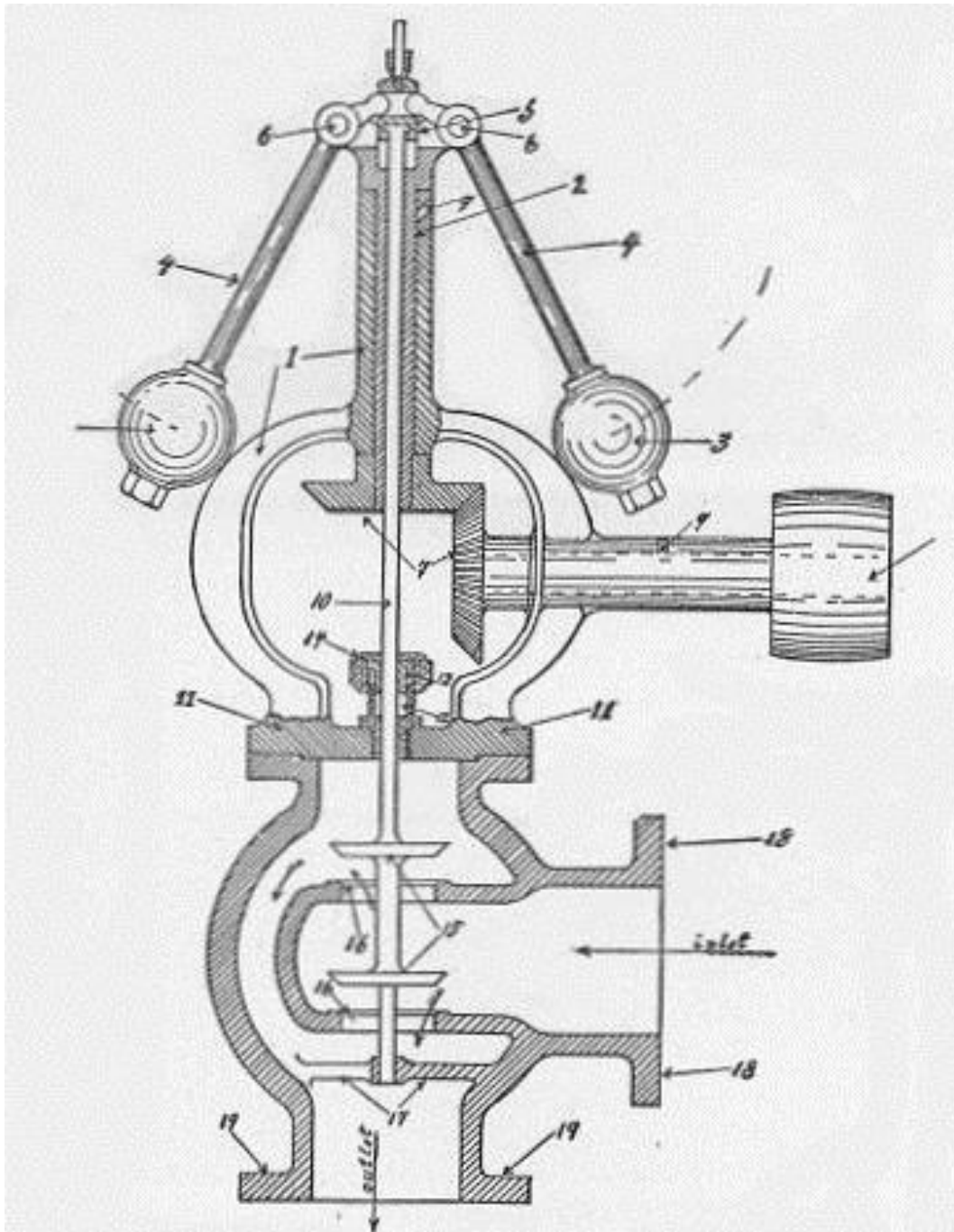


Figura 29: Regulador centrífugo que mueve una válvula lineal de asiento ^[30].

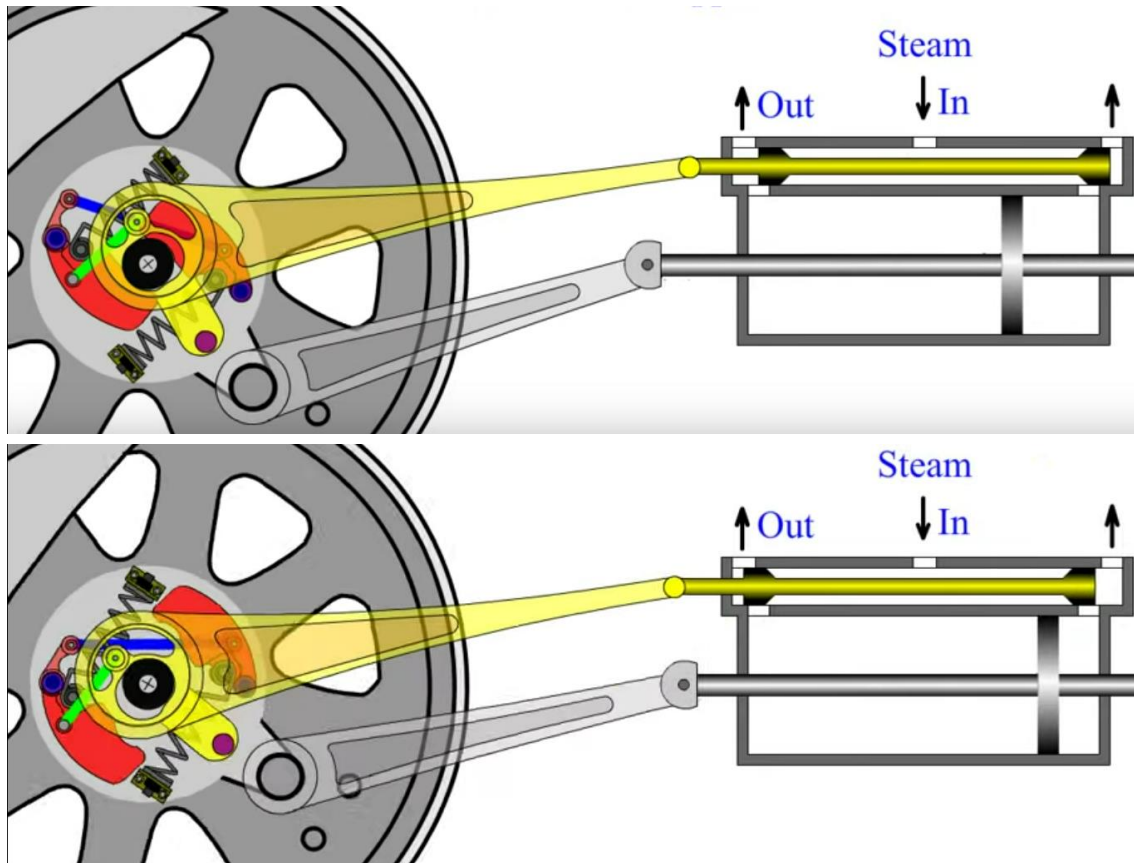


Figura 30: Regulador de velocidad de inercia a baja velocidad (arriba) y a alta velocidad (abajo) ^[31].

➤ Clasificación según velocidad de trabajo:

- **Baja:** Cuando la velocidad del eje es inferior a 100 revoluciones por minuto (r.p.m.).
- **Media:** Cuando la velocidad del eje está entre 100 y 250 revoluciones por minuto (r.p.m.).
- **Alta:** Cuando la velocidad del eje es superior a 250 revoluciones por minuto (r.p.m.) ^[32] ^[33].

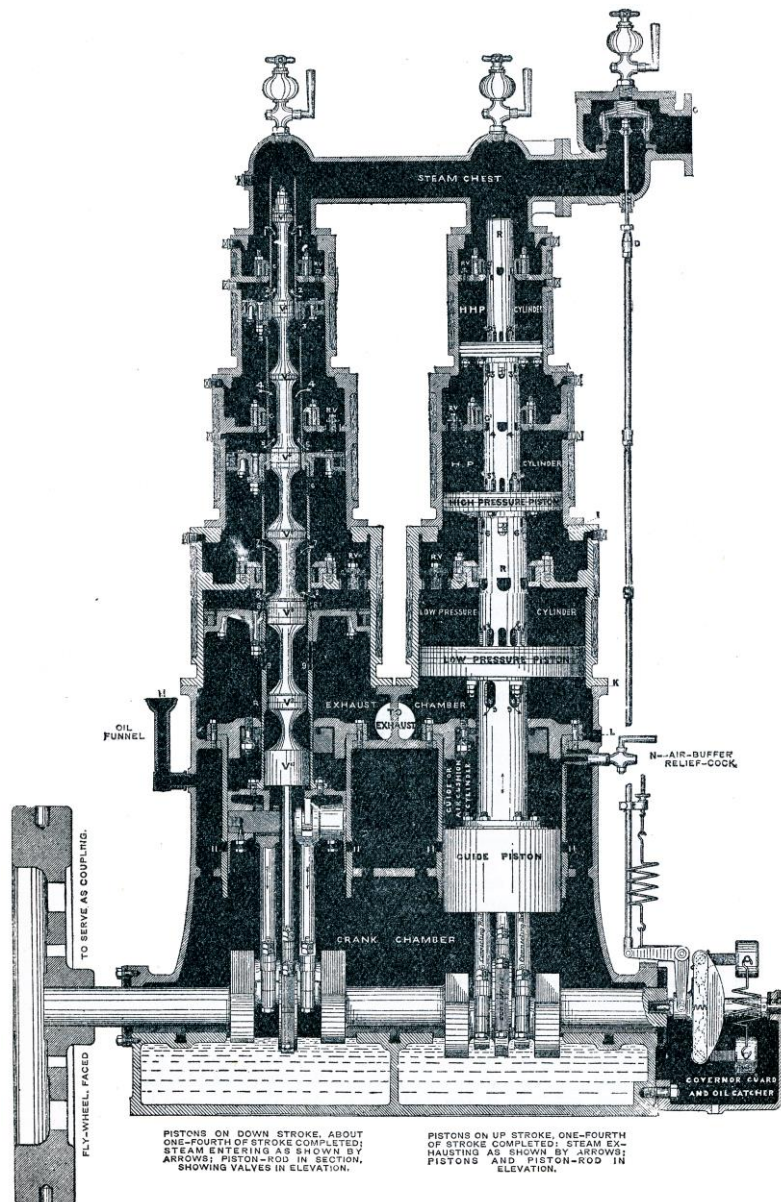


Figura 31: Sección de máquina de vapor de válvula central de alta velocidad, Willans [34].

4.3 Aplicaciones máquinas de vapor

Las máquinas de vapor comenzaron a utilizarse para bombear agua, pero conforme se desarrolló esta tecnología se le dio múltiples aplicaciones. Los primeros usos que tuvieron las máquinas de vapor de pistón fueron para mover maquinaria en fábricas y minas.

Eran máquinas estacionarias que proporcionaban la velocidad y potencia necesarias para realizar las tareas industriales. Esto permitió mejorar la fabricación de piezas, pudiendo crear máquinas de vapor de forma más precisa y que fueran así más eficientes. Más tarde se aplicó la tecnología de la máquina de vapor al transporte, donde tuvo gran relevancia el ferrocarril.

Esto permitió viajar grandes distancias y más rápido tanto de forma terrestre como marítima.

Con la invención de la bombilla y las máquinas eléctricas, las máquinas de vapor se comenzaron a usar como generadores eléctricos. En los trenes y en los barcos, donde en un principio las máquinas de vapor solo proporcionaban el movimiento, también se utilizaron las máquinas de vapor para calefacción y para generación eléctrica, permitiendo también tener iluminación con bombillas.

Las máquinas de vapor pueden clasificarse según la aplicación en que se usan:

➤ Máquinas estacionarias:

- Para bombear agua:

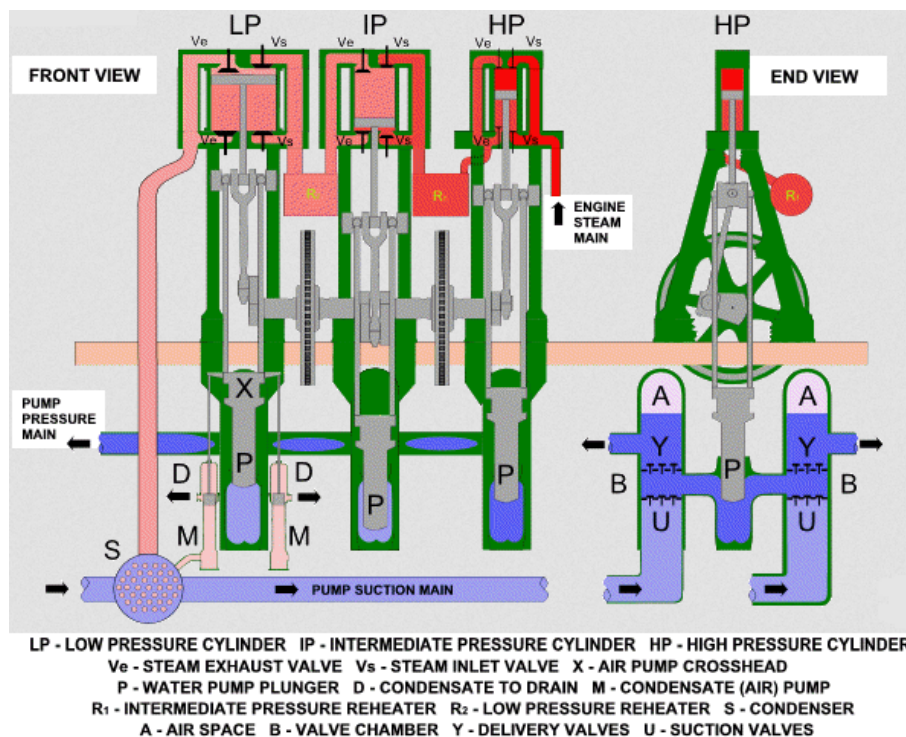


Figura 32: Diagrama de una bomba de agua de vapor de triple expansión [35].

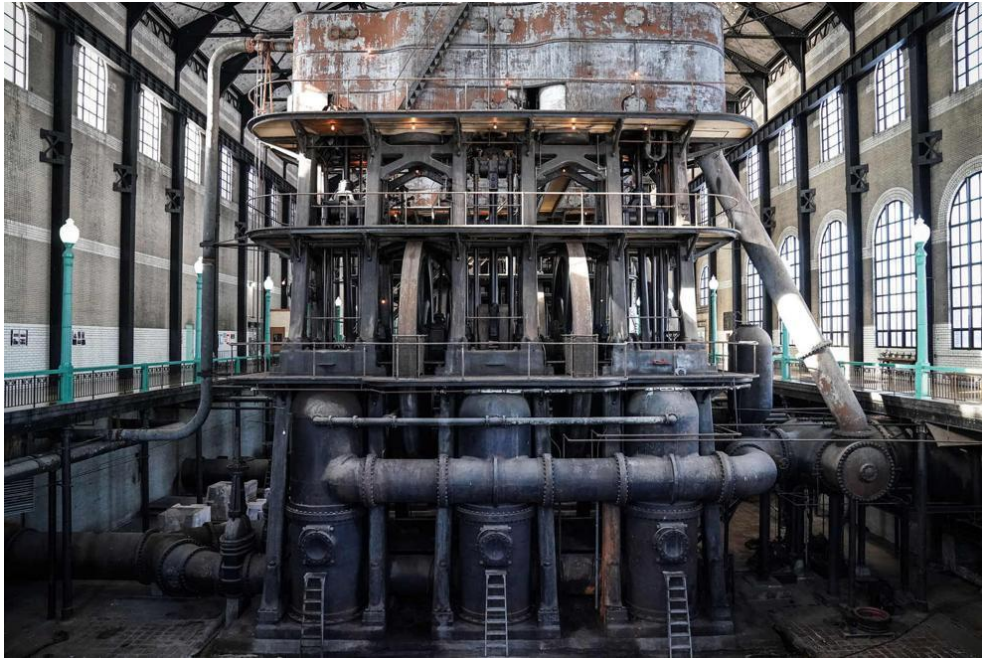


Figura 33: Bomba de agua de vapor de triple expansión en una estación de bombeo de agua [36].

- Para mover maquinaria en fabricas:

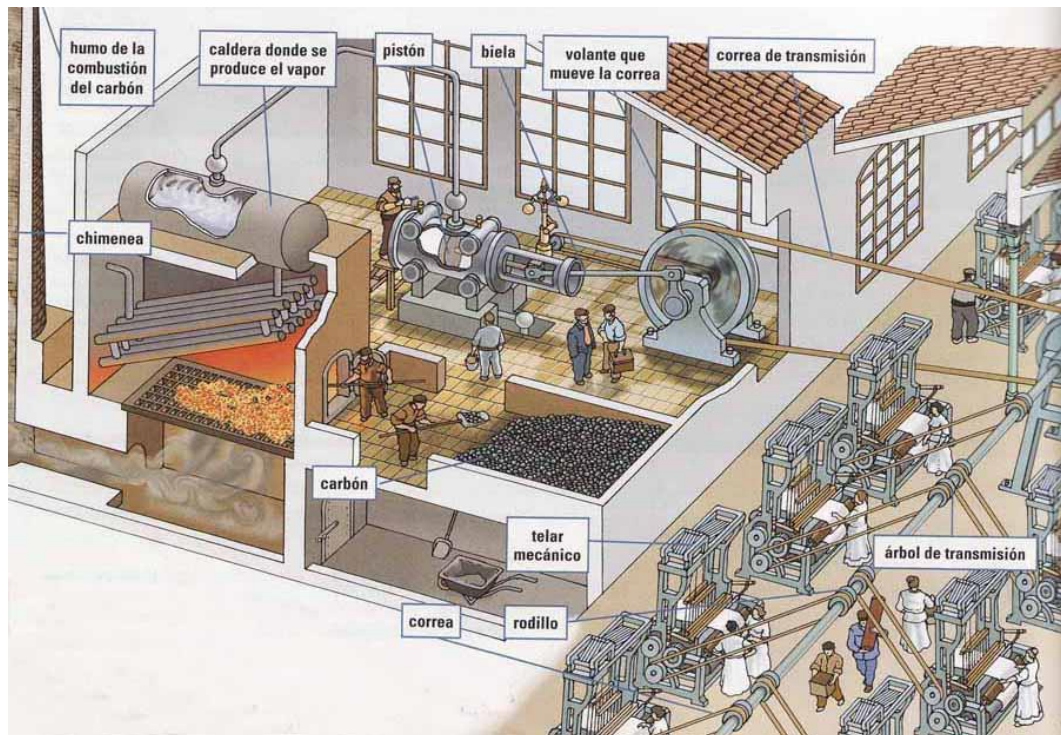


Figura 34: Ilustración de fábrica textil, donde se ve la zona del taller y la zona de la máquina de vapor [37].

- Para generación de electricidad:



Figura 35: Generador eléctrico a vapor ^[38].

- **Semiportátil:** Este tipo de máquinas se construían como una sola unidad incluida la caldera, para que pudieran instalarse rápidamente en el sitio y ponerse en funcionamiento. Se utilizaron en proyectos de ingeniería civil y minería, impulsando bombas de agua, compresores de aire, maquinaria de obra como grúas y cabrestantes.

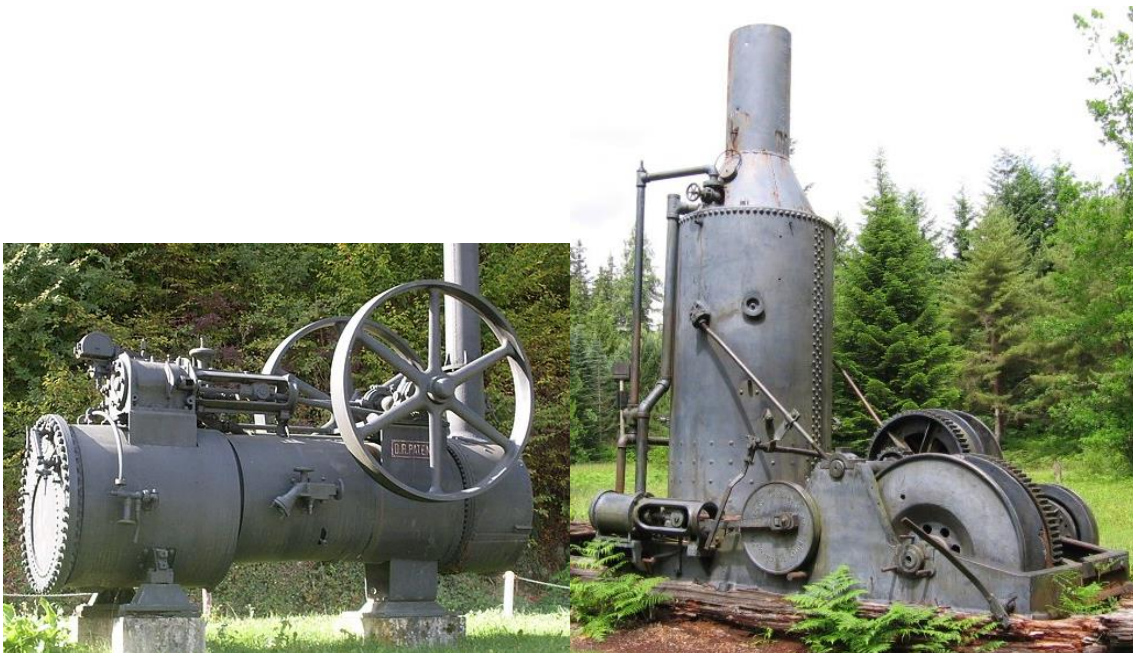


Figura 36: Máquina semiportátil, como fuente de potencia para otra máquina (izquierda) ^[39]. Burro de vapor, cabrestante utilizado en la industria maderera (derecha) ^[40].

➤ Máquinas para transporte:

-Terrestre

• Transporte por carretera:

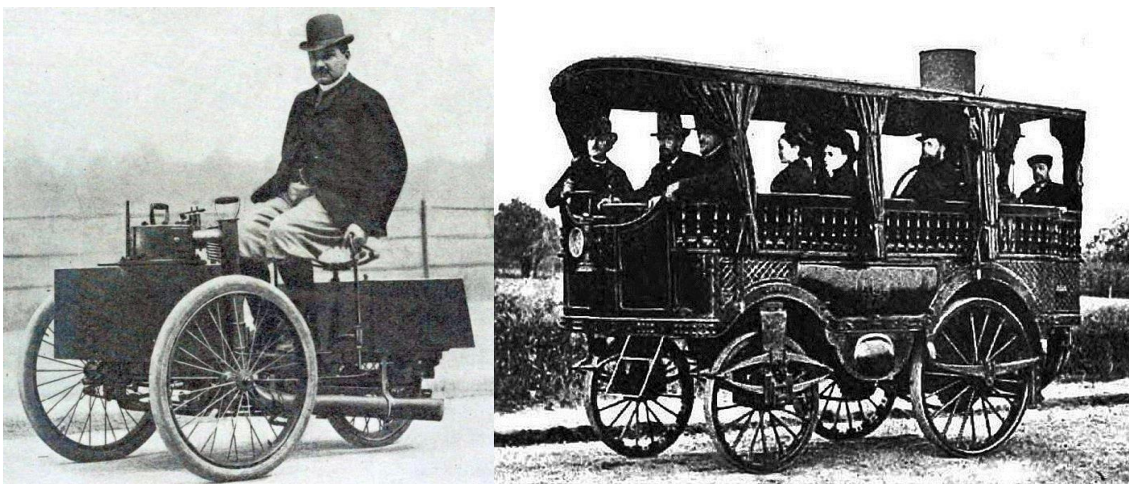


Figura 37: Triciclo de vapor (izquierda) y autobús de vapor (derecha).



Figura 38: Coche de vapor de 1923 (izquierda) y de 1975 (derecha).



Figura 39: Camión de vapor ^[41].

- Máquinas agrícolas:

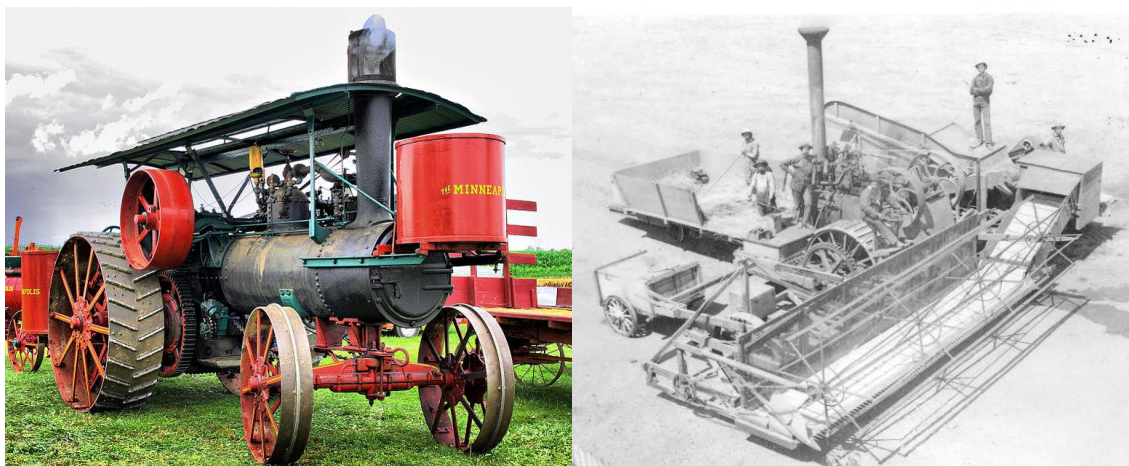


Figura 40: Tractor de vapor (izquierda) ^[42] y cosechadora de vapor (derecha) ^[43].

- Máquinas de construcción:

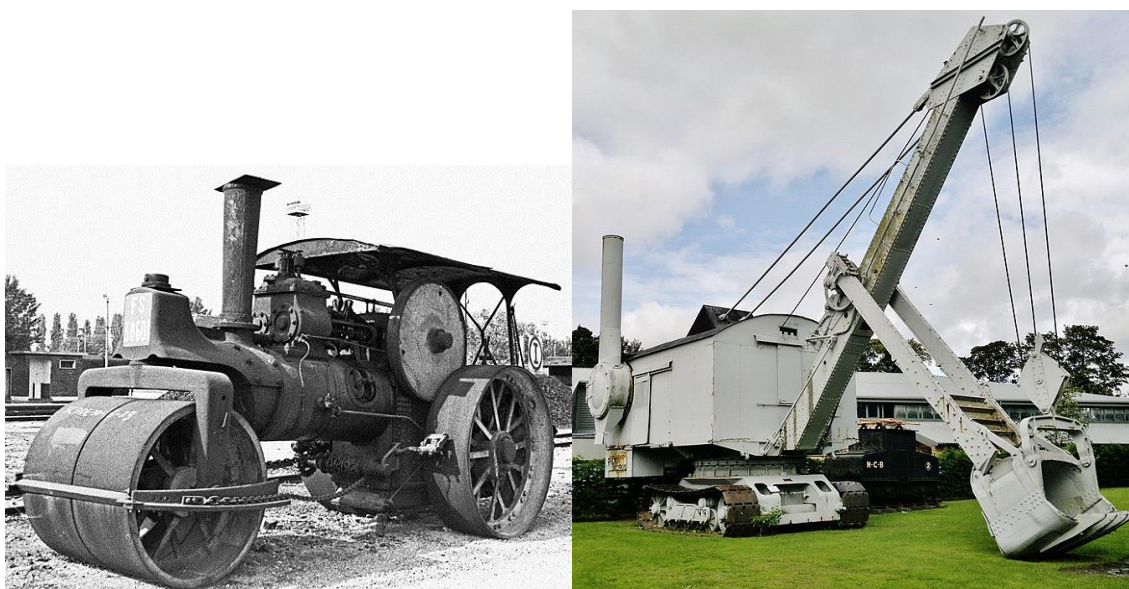


Figura 41: Apisonadora de vapor (izquierda) ^[44] y excavadora de vapor (derecha) ^[45].



Figura 42: Grúa de vapor [46].

- Transporte por rail:



Figura 43: Locomotora de vapor [47].

-Marinas

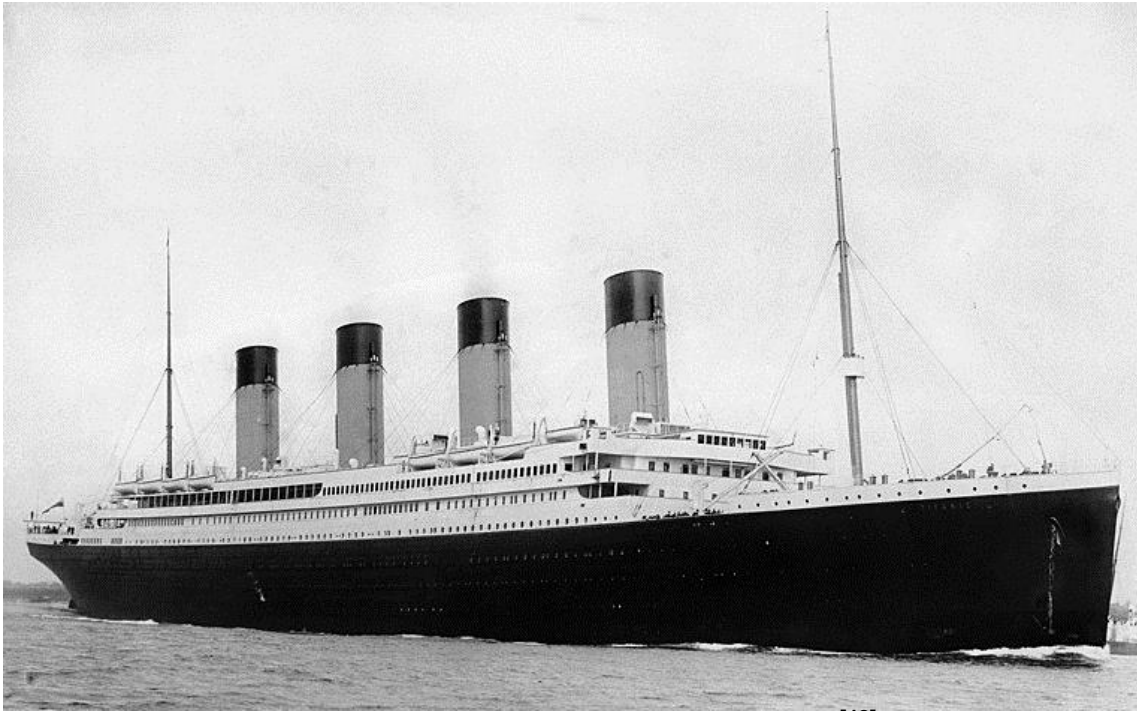


Figura 44: Barco de vapor (RMS Titanic 1912) ^[48].

-Militar



Figura 45 Tanque de vapor (izquierda) ^[49] y catapulta de vapor (derecha) ^[50].

-Aviación

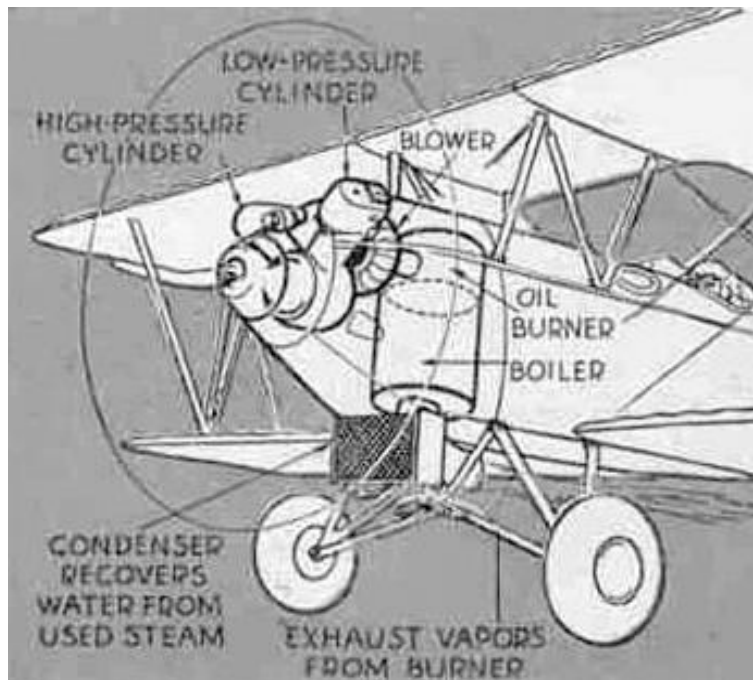


Figura 46: Diagrama de los componentes del avión a vapor (arriba) y foto del avión (abajo) ^[51].

5 Componentes de una máquina de vapor de pistón y su funcionamiento.

Las máquinas de vapor de pistón son máquinas térmicas de combustión externa, es decir, el combustible es quemado en un dispositivo externo de la parte de la máquina destinada a producir trabajo.

Una máquina térmica es un dispositivo que trabaja cíclicamente tomando calor de un foco caliente, realizando trabajo y entregando calor residual a un foco frío.

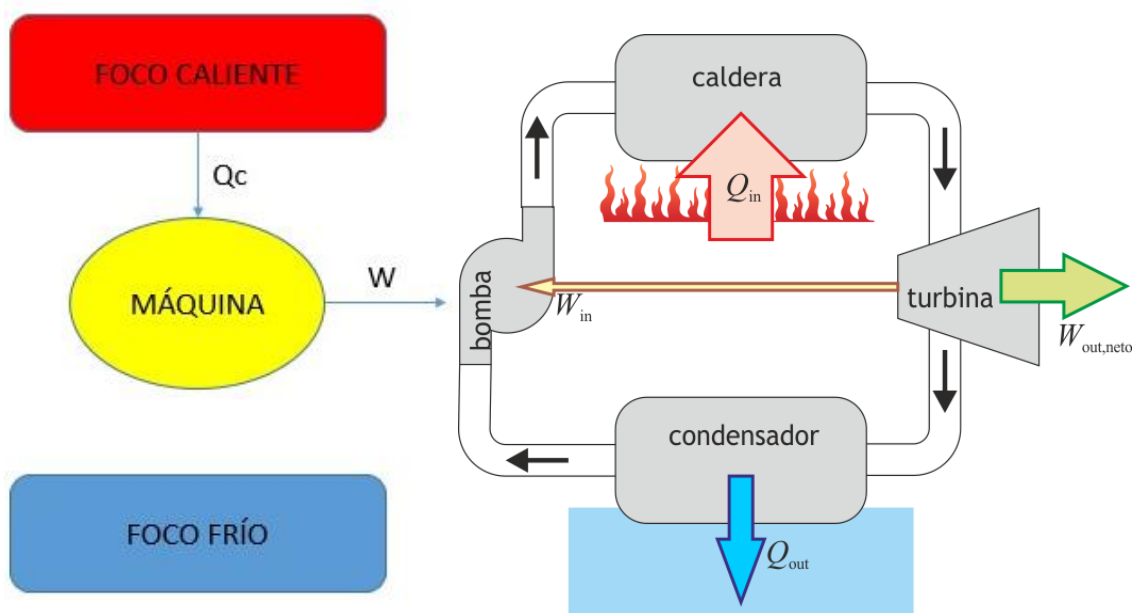


Figura 47: Esquema básico de una máquina térmica [52].

Los componentes básicos de una máquina de vapor son los siguientes:

5.1 Caldera, (generador de vapor)

La caldera es el foco caliente, donde una fuente de calor calienta el agua para producir vapor a alta presión. Generalmente el combustible utilizado en las calderas era el carbón mineral, aunque también se podía utilizar madera. Las calderas actuales utilizan como combustible gas (gas natural, propano), gasoil, aceite, pellets (biomasa), electricidad y en centrales nucleares uranio.

Las calderas utilizadas en las máquinas de vapor estacionarias y en locomotoras eran generalmente del tipo piro-tubular (tubos de fuegos). Estas calderas se componen de tres partes principales: el fogón (también llamado cámara de combustión o caja de fuego), los tubos de fuego (intercambiador de calor) y la caja de humos. Las calderas tenían forma cilíndrica y se colocaban en posición horizontal.

El fogón podía ser también circular, en los diseños más simples, siendo toda la caldera un cilindro, o podía ser con forma de rectangular o de cajón, siendo esta forma la más utilizada.

El intercambiador de calor de tubos de fuego es un depósito sellado de agua atravesado longitudinalmente por tubos. De este modo se obtiene una gran superficie de intercambio de calor.

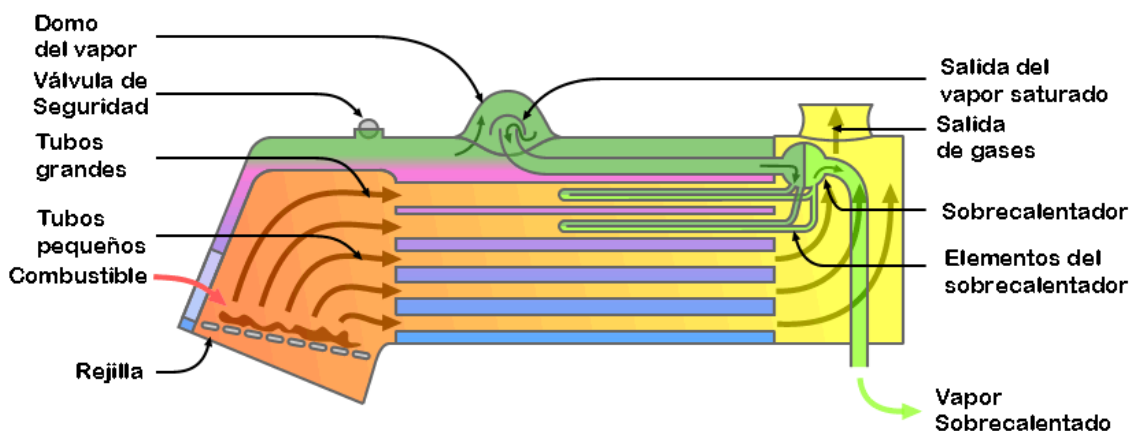


Figura 48: Diagrama esquemático de una caldera de piro-tubular.

Para conseguir generar el vapor se quema el combustible (carbón) en el fogón, los gases calientes producidos como consecuencia de la combustión pasan a través de los tubos de fuego. Estos gases calientan la pared interior de los tubos, que por conducción transfieren calor a la pared exterior que esta en contacto con el agua, calentando esta hasta producir vapor de agua. El vapor a alta presión se acumula en la parte superior de la caldera (domo de vapor) y sale por una tubería hacia el motor. Los gases calientes salen de los tubos en la caja de humos donde fluyen al exterior por la chimenea, solos, si la chimenea es alta y la máquina tiene condensador, o con el vapor que ha salido de los cilindros si es una máquina de vapor sin condensador.

En este último caso el vapor que sale por la chimenea crea un vacío parcial que ayuda a evacuar los gases calientes.

El fogón esta abierto por la parte inferior permitiendo que entre el aire necesario para la combustión y para permitir la extracción de ceniza.

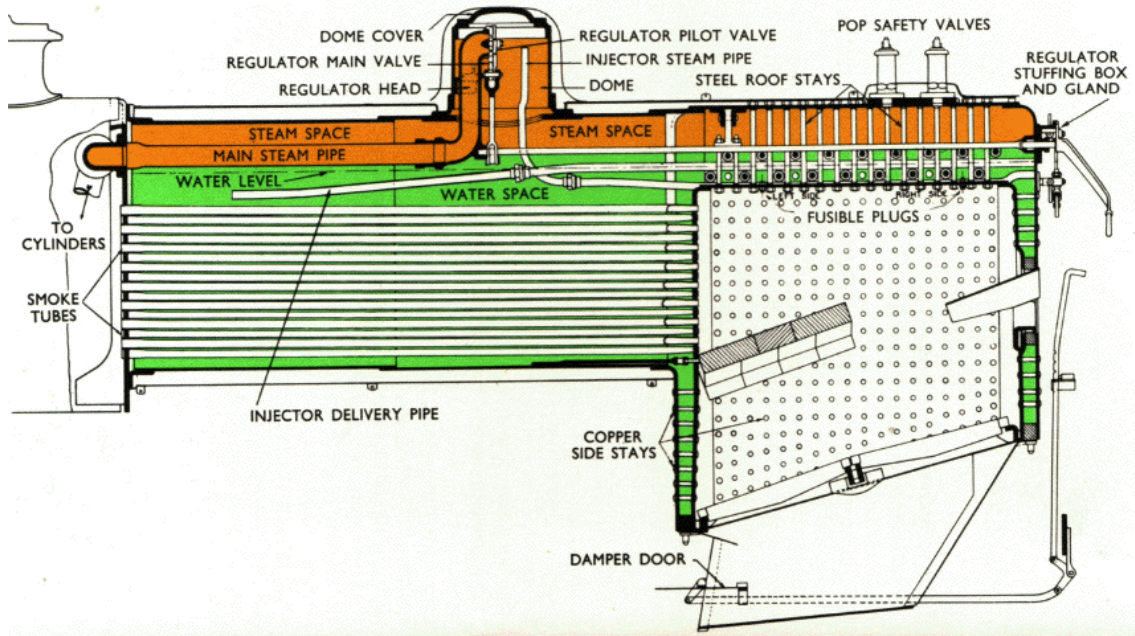


Figura 49: Diagrama de la sección de una caldera de vapor, con el fogón a la derecha y parte de la caja de humos a la izquierda.

Las paredes de metal del fogón se denominan paramentos o planchas, y su posición relativa es asegurada por una serie de soportes (aletas o tensores). Estos soportes unen el fogón y la carcasa de la caldera, y refuerzan los paramentos del fogón evitando que se deformen por la presión generada por el agua y el vapor que lo rodean. El exterior del fogón debe estar cubierto de agua por los lados y por la parte superior, porque si la parte superior del fogón deja de estar cubierta de agua la temperatura puede aumentar mucho, debilitando los soportes, y se puede producir la explosión de la caldera.

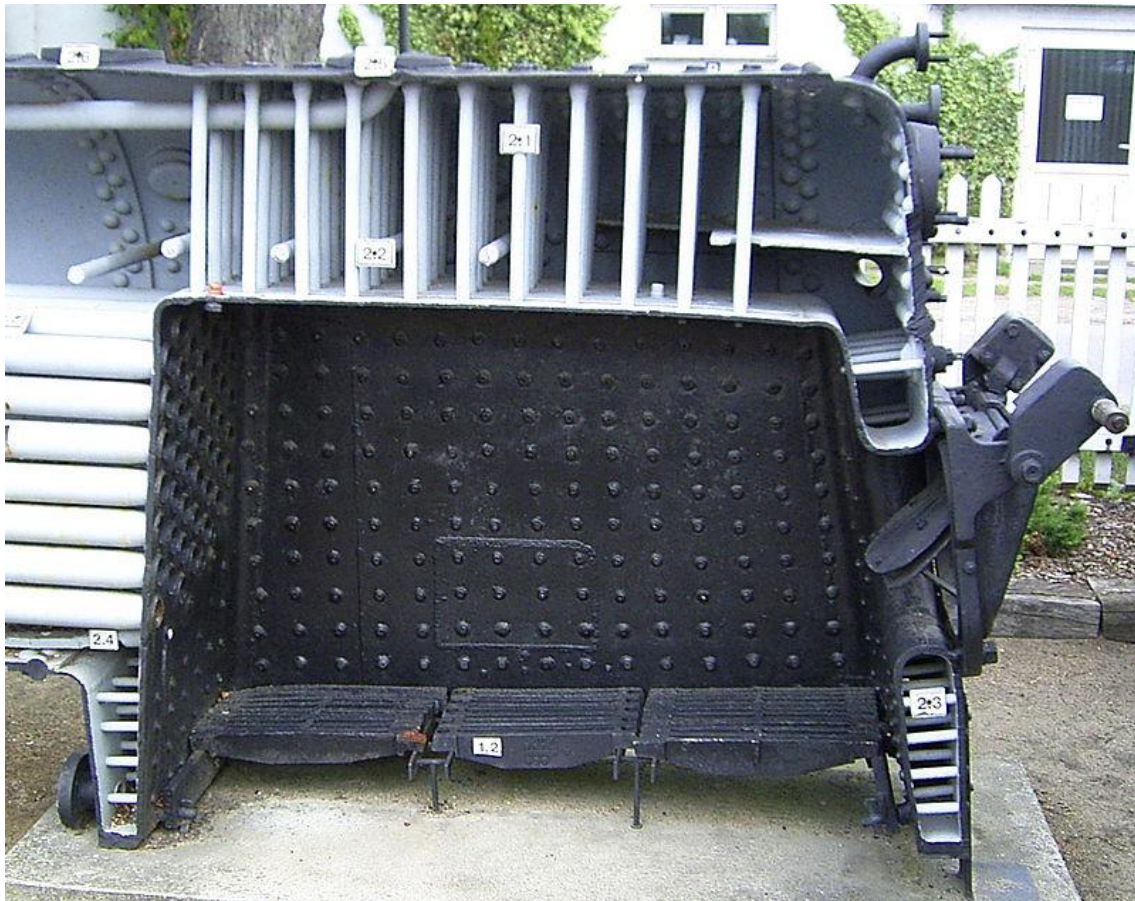


Figura 50: Corte de un fogón y de la caldera con soportes radiales ^[53].

La caldera es el elemento de la máquina de vapor que mayor volumen ocupa, siendo en máquinas pequeñas más grande que el propio motor, y en motores grandes se utilizan muchas caldera, más pequeñas que el motor ^[54].

5.2 Válvula de distribución, (entrada y salida de vapor en el cilindro)

La válvula de distribución es un dispositivo accionado por el propio motor, que permite la entrada del vapor al cilindro y salida del vapor del cilindro. Como se ha comentado anteriormente en el apartado “4.2 Tipos máquinas de vapor, Clasificación según tipo de válvulas”, existen diferentes tipos de válvulas. Las más utilizadas eran las deslizantes, las de corredera y pistón, siendo estas últimas más eficientes y más fáciles de fabricar.

La válvula funciona de forma sincronizada con el movimiento del pistón y es accionada por un mecanismo de biela-excéntrica. Utiliza una excéntrica porque tiene una carrera mucho menor que el pistón. La mayoría de las válvulas de pistón son del tipo de "admisión interior", donde se introduce vapor desde la caldera a través del espacio entre las dos cabezas de la válvula de distribución, y el vapor de escape sale a través del espacio entre la cabeza de la válvula de distribución y el extremo de la caja de distribución. La ventaja de esta disposición es que las fugas, a través del prensaestopas que sella la caja de distribución con el vástago de la válvula, son mucho menos problemáticas cuando el prensaestopas está sometido a la baja presión de escape, en lugar de a la alta presión de admisión [55].

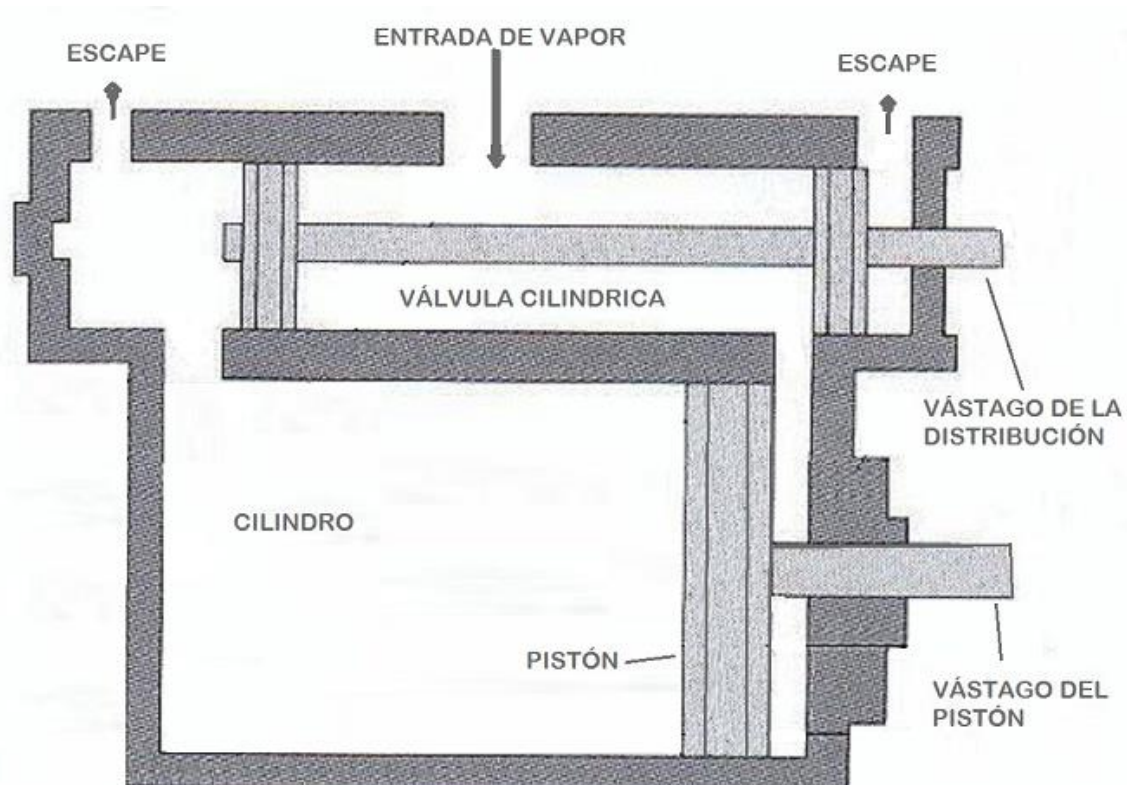


Figura 51: Esquema básico de válvula de distribución de pistón y cilindro [56].

El extremo del vástago de distribución podía ir unido directamente a la biela, sin necesidad de guía porque el pistón es lo suficientemente largo como para hacer de guía, o podía ir unido a una cruceta con guía, y esta ir unida a la biela.

Esta segunda opción se utilizaba cuando la válvula no estaba en el mismo plano horizontal que el eje de la máquina o también porque permitía un mejor ajuste de la válvula. Si era común utilizar guía en las válvulas de corredera ya que este tipo de válvulas no se guiaba por si sola.

La caja de distribución podía ser un elemento fabricado de forma independiente al cilindro, y atornillado a este, o podía ser fabricado todo en una pieza.

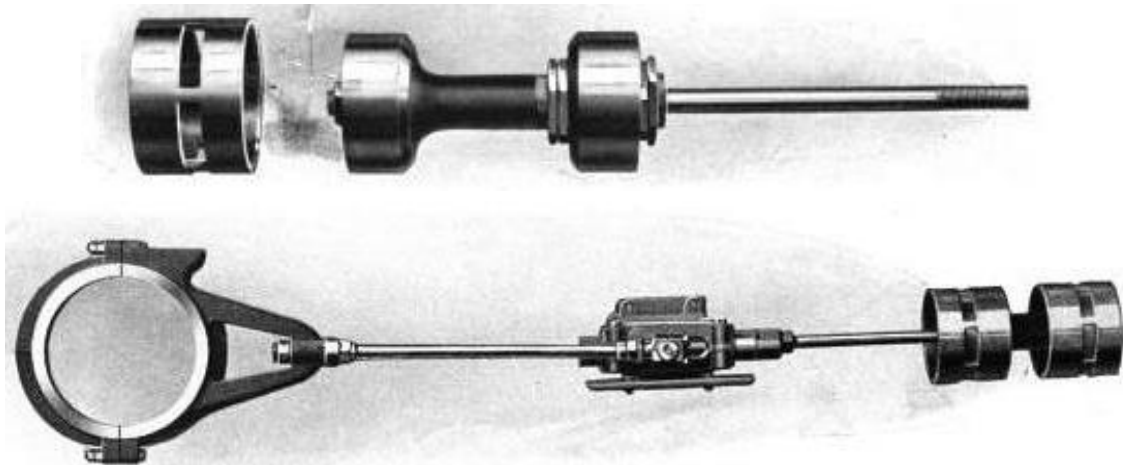


Figura 52: Pistón unido al vástago y camisa con lumbreras de un extremo de la válvula (arriba). Conjunto válvula de pistón con cruceta unida a la biela de la excéntrica (abajo).

5.3 Cilindro, (transformación de presión en fuerza)

El cilindro es la cavidad en la que entra el vapor a presión, cuando la válvula permite el paso de vapor por un extremo, empujando el pistón y el vástago al que esta unido. En el caso de un cilindro de doble efecto, cuando el vapor ha empujado el pistón hasta el extremo, la válvula de distribución permite la salida de vapor por el extremo alejado del pistón y la entrada de vapor por el extremo en que se encuentra el pistón, empujando este a la posición inicial tirando del vástago.

Los conductos de entrada y salida de vapor que comunican la válvula de distribución con el cilindro parten de la zona central de la válvula y se dirigen a los extremos del cilindro de forma serpenteante.

Tiene esta forma porque de este modo la válvula de distribución puede ser mas compacta, y aunque sea una forma más compleja, la fabricación de la válvula y el cilindro se realizaba por fundición, lo que permitía realizar formas complejas. Si se realiza un conducto recto perpendicular al cilindro y la válvula, hay que tener en cuenta la longitud de las cabezas del pistón de la válvula, lo que crea una caja de distribución más larga que el cilindro (como se ve en la figura: 51).

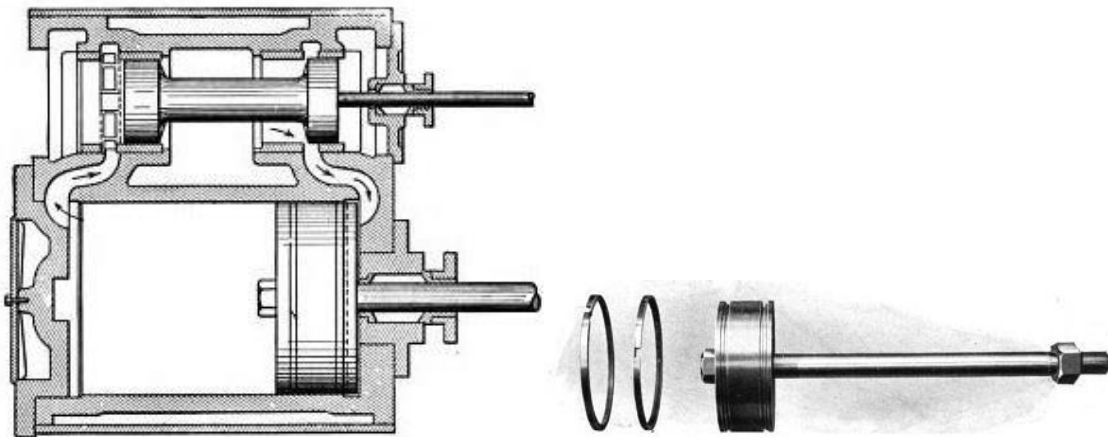


Figura 53: Caja de distribución y cilindro (izquierda). Pistón y anillos de estanqueidad (derecha).

El pistón de doble efecto va unido aun vástago que transmite la fuerza. El extremo del vástago se une a una pieza llamada cruceta. Esta pieza se desliza por una guía y une el vástago con la biela. Se necesita una guía porque el pistón tiene un diámetro mucho mayor que su longitud, y al transformar el movimiento alternativo al circular, mediante un mecanismo biela-manivela, se generan unas fuerzas con componentes perpendiculares al desplazamiento de pistón. Estas fuerzas tienden a girar el pistón y a aumentar el rozamiento, es por esta razón por la que la guía es necesaria, ya que impide que el pistón gire soportando estas fuerzas las guías.

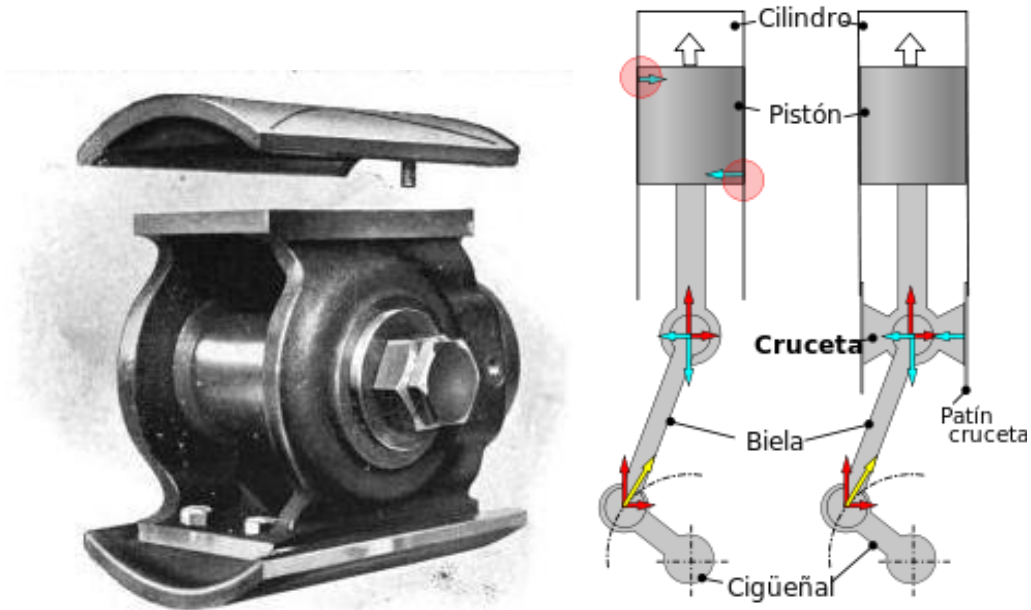


Figura 54: Cruceta (izquierda). Diagrama de transferencia de fuerzas con y sin cruceta (derecha) [57].

5.4 Biela-manivela, (transformación de movimiento alternativo en movimiento rotativo)

El mecanismo biela-manivela transforma el movimiento alternativo del pistón en movimiento rotatorio. Se transmite la fuerza del vástago a un extremo de la biela, y el otro extremo de la biela transmite la fuerza a la manivela. Esta, unida al eje de la máquina, produce la rotación del mismo.

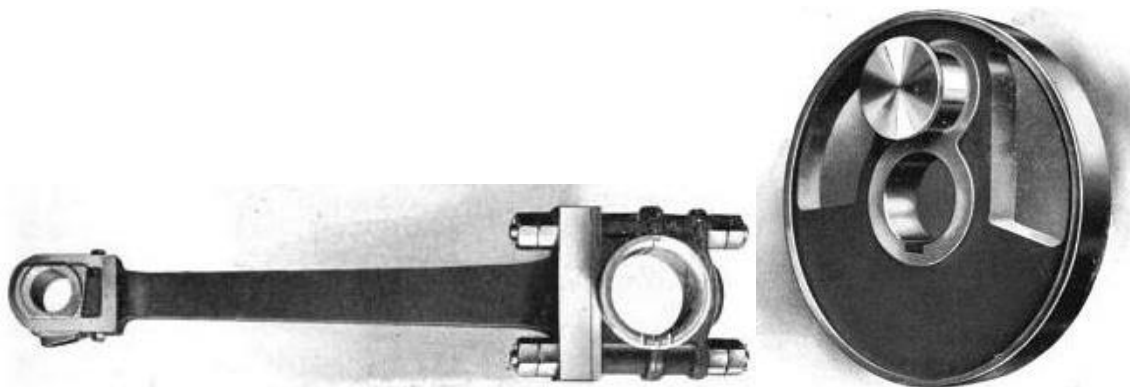


Figura 55: Biela (izquierda). Manivela (derecha).

La manivela, podía ser una barra o eslabón de diseño simple, lo que producía vibraciones o, podía formar parte de un disco o poseer un contrapeso para suavizar las vibraciones.

5.5 Volante de inercia, (almacenamiento de energía)

El volante de inercia es una rueda de mucha masa, generalmente acumulada en forma de anillo, cuyo objetivo es almacenar energía cinética. De esta forma se suaviza la rotación del eje de la máquina, ya que la potencia transmitida por el pistón es oscilatoria.

Los volantes de inercia de máquinas estacionarias de fabricas podían tener dimensiones tan grandes que era necesario realizar un corte o cavidad en el suelo para poder alojar el volante en los soportes del eje. Se colocaba el eje a una altura no excesiva para estar más accesible para labores de mantenimiento y para evitar soportes muy altos.

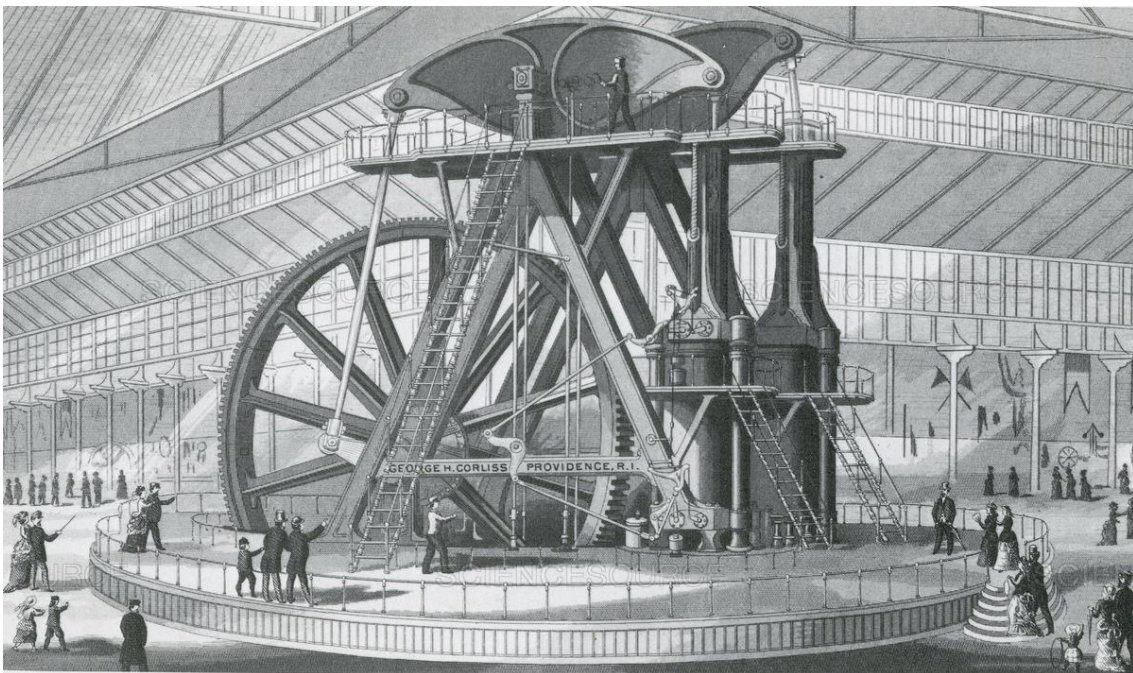


Figura 56: Máquina de vapor con volante de inercia de grandes dimensiones, “Corliss Centennial Engine”, 1876 ^[58].

5.6 Eje o árbol de la máquina, (transferir movimiento)

El eje de la máquina trasfiere la fuerza realizada por la manivela, y convertida por esta en un giro, a una polea para transmitir movimiento y potencia a una máquina o a un eje de transmisión. La transferencia de movimiento generalmente se producía por una polea o por una rueda dentada (engranaje) que se unían al eje. También van unidos al eje la manivela el volante de inercia, los rodamientos o cojinetes y la excéntrica, aunque esta última podía mecanizarse como parte integral del eje.

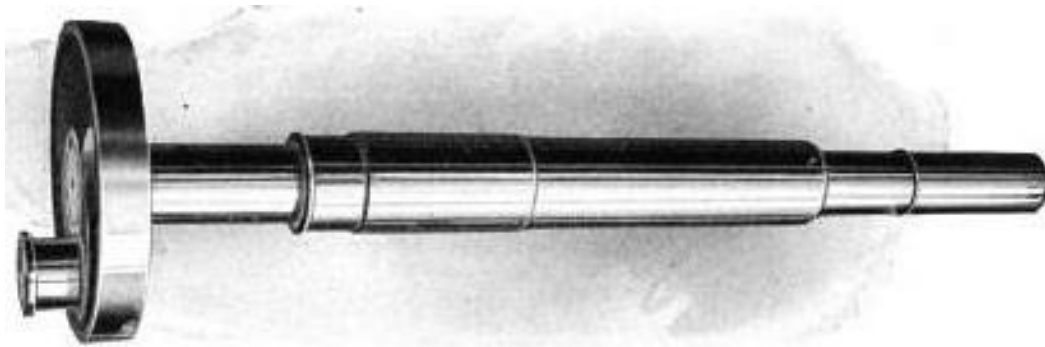


Figura 57: Eje con manivela ^[59].

En algunos casos el elemento que transmitía el movimiento era el volante de inercia, que actuaba como polea o como engranaje si tenía el borde exterior dentado.

5.7 Regulador, (limitar velocidad)

El regulador era un dispositivo para limitar y mantener constante la velocidad de giro de la máquina. Como se ha visto en el apartado “4.2 Tipos máquinas de vapor, Clasificación según tipo de control” existían dos tipos, los centrífugos y los inerciales, siendo los más utilizados los primeros. El movimiento del eje de la máquina se transmite al eje del regulador por poleas o engranajes.

El regulador consta de unos brazos, con unos contrapesos en los extremos, unidos a la cabeza del eje del regulador. Con el giro la fuerza centrífuga que actúa sobre los contrapesos hace que los brazos se abran. Estos también están unidos a otros eslabones que van unidos a una manga. Al abrirse los brazos, estos tiran de los eslabones y estos levantan la manga. El movimiento vertical de la manga se transmite directamente o por palancas a una válvula, de asiento o de mariposa, que ofrece más o menos resistencia al paso de vapor. De esta manera se regula la cantidad de vapor que entra en el cilindro y por tanto las revoluciones del eje de la máquina de vapor.

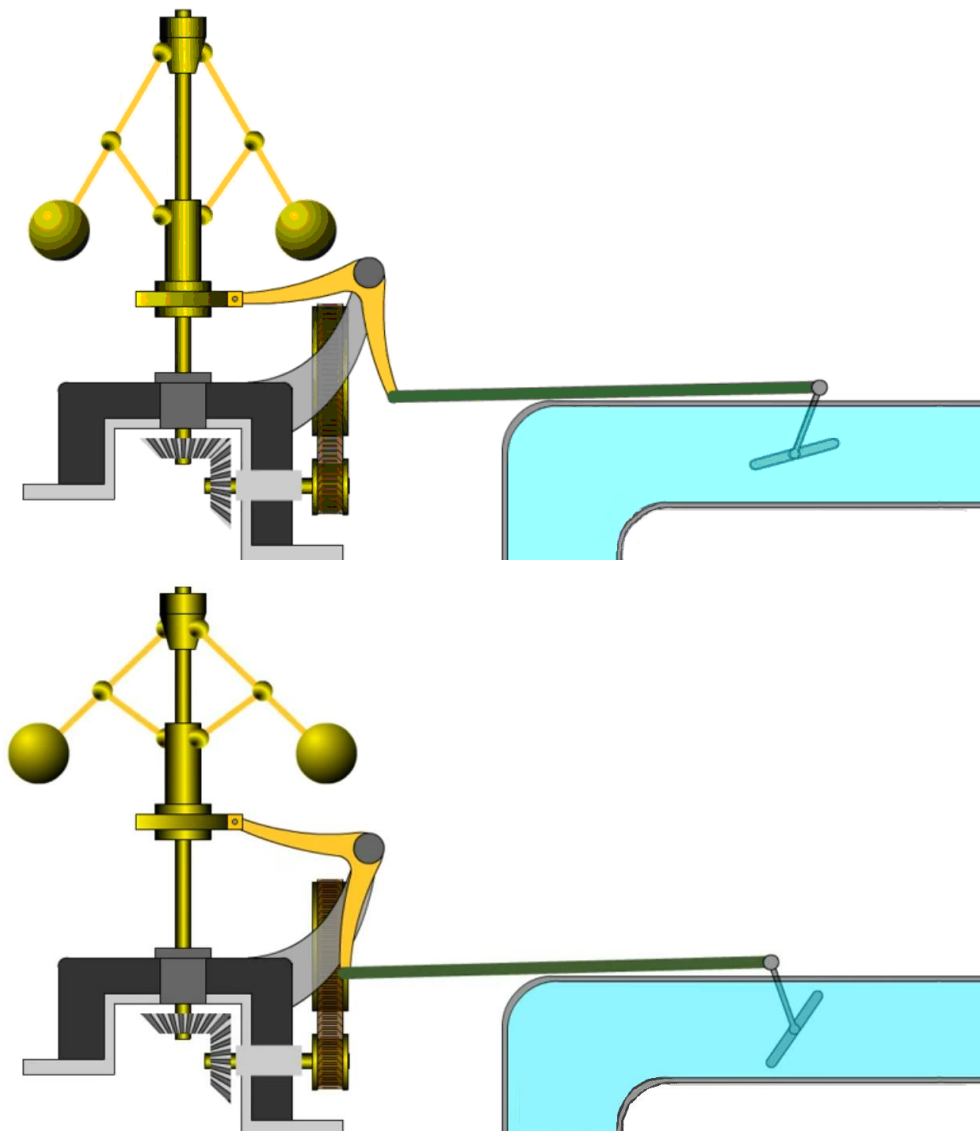


Figura 58: Regulador centrífugo trabajando a bajas revoluciones (arriba) y a altas revoluciones (abajo) ^[60].

6 Diseño preliminar (Croquis de distribución del conjunto y mecanismos).

Se diseña una máquina de vapor de tipo estacionario, con un cilindro en posición horizontal, con válvula de distribución de tipo pistón y con un regulador centrífugo que acciona una válvula de mariposa.

Aunque en un principio se pretendía hacer una caldera seccionada y un eje de salida, se ha simplificado el diseño eliminando estas partes por razones de tiempo (plazo establecido para la entrega de TFG en junio). Se considera que la eliminación de estas partes no supone un gran cambio respecto a la idea inicial ya que se van a conservar las partes móviles y los mecanismos más importantes. Al no colocar el eje de salida se decide realizar un accionamiento manual en vez de eléctrico para reducir el número de componentes.

El cilindro y la válvula de distribución, de tipo pistón, se diseñan como una sola pieza. El sistema de guía de la cruceta se diseña de forma que la cruceta tiene un borde a cada lado que encaja en el interior de una ranura que posee cada guía.

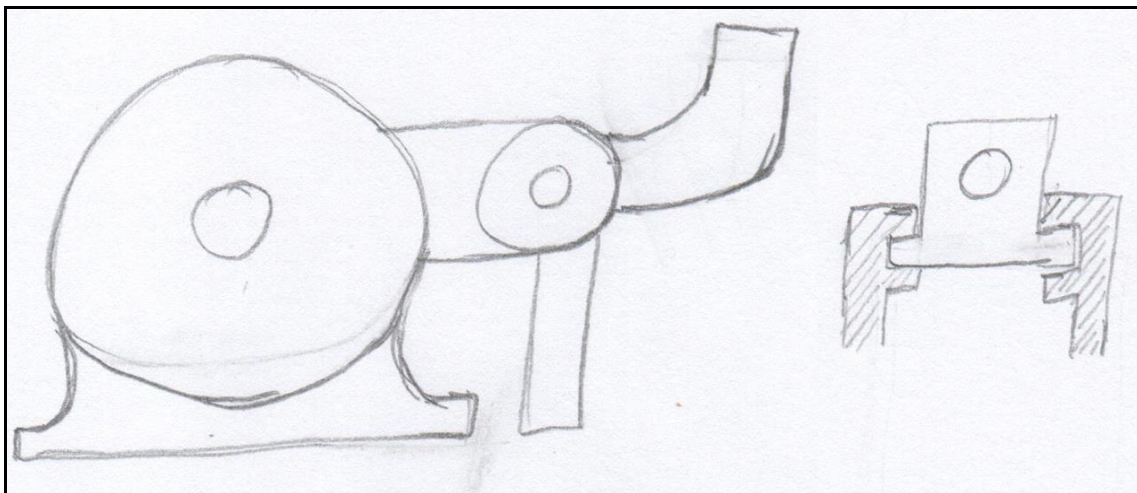


Figura 59: Croquis del perfil del Cilindro-Válvula (izquierda) y sección transversal del sistema de guías de la cruceta (derecha) [Fuente: *Elaboración propia*].

El regulador centrífugo se diseña de tal forma que mueve la manga verticalmente y este movimiento se transmite a una válvula de mariposa, colocada en el conducto de admisión de la válvula de distribución, mediante un sistema de palancas y una barra.

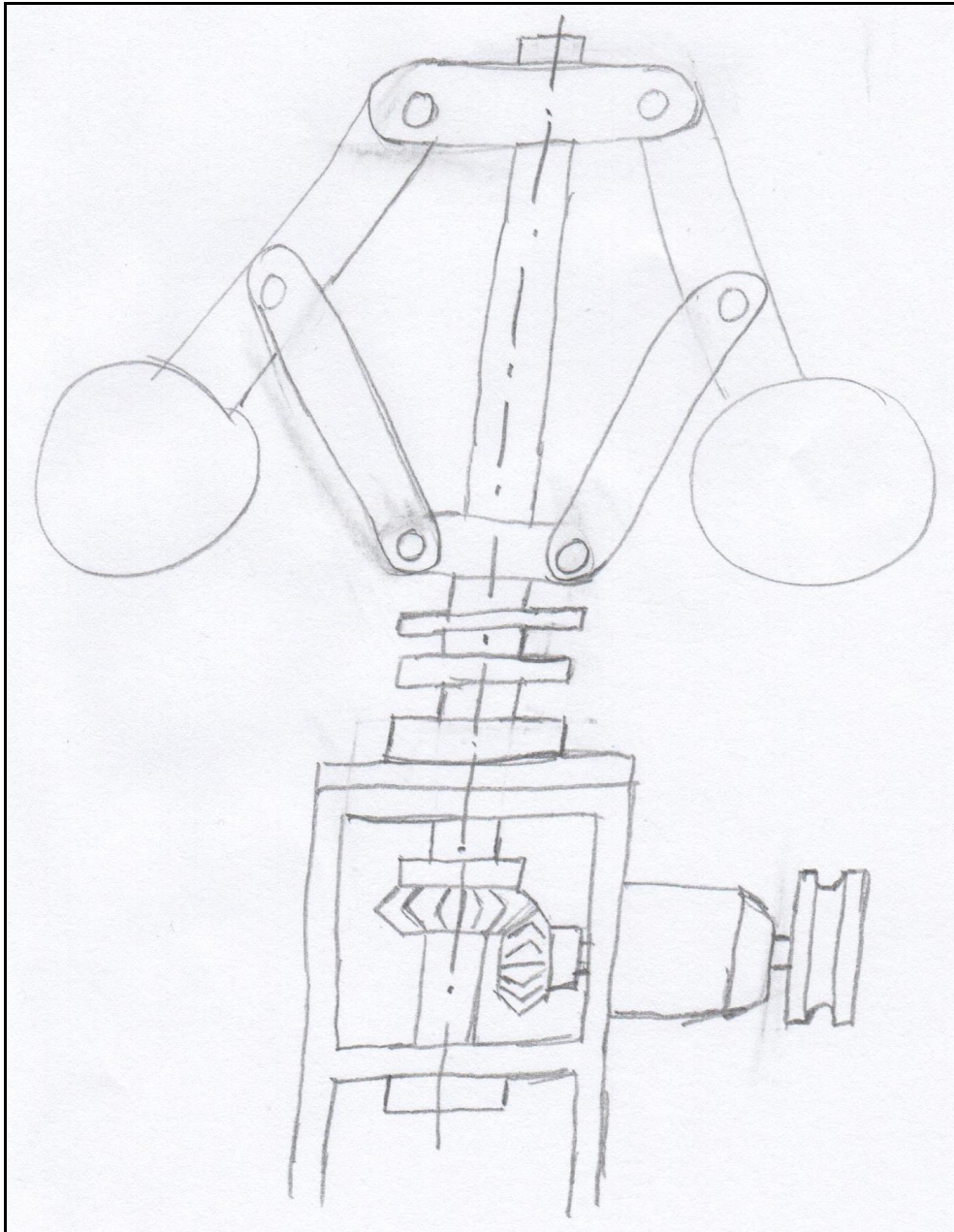


Figura 60: Croquis del regulador centrífugo con la polea y engranajes [Fuente: *Elaboración propia*].

Se realiza un croquis de la distribución en planta de la máquina de vapor.

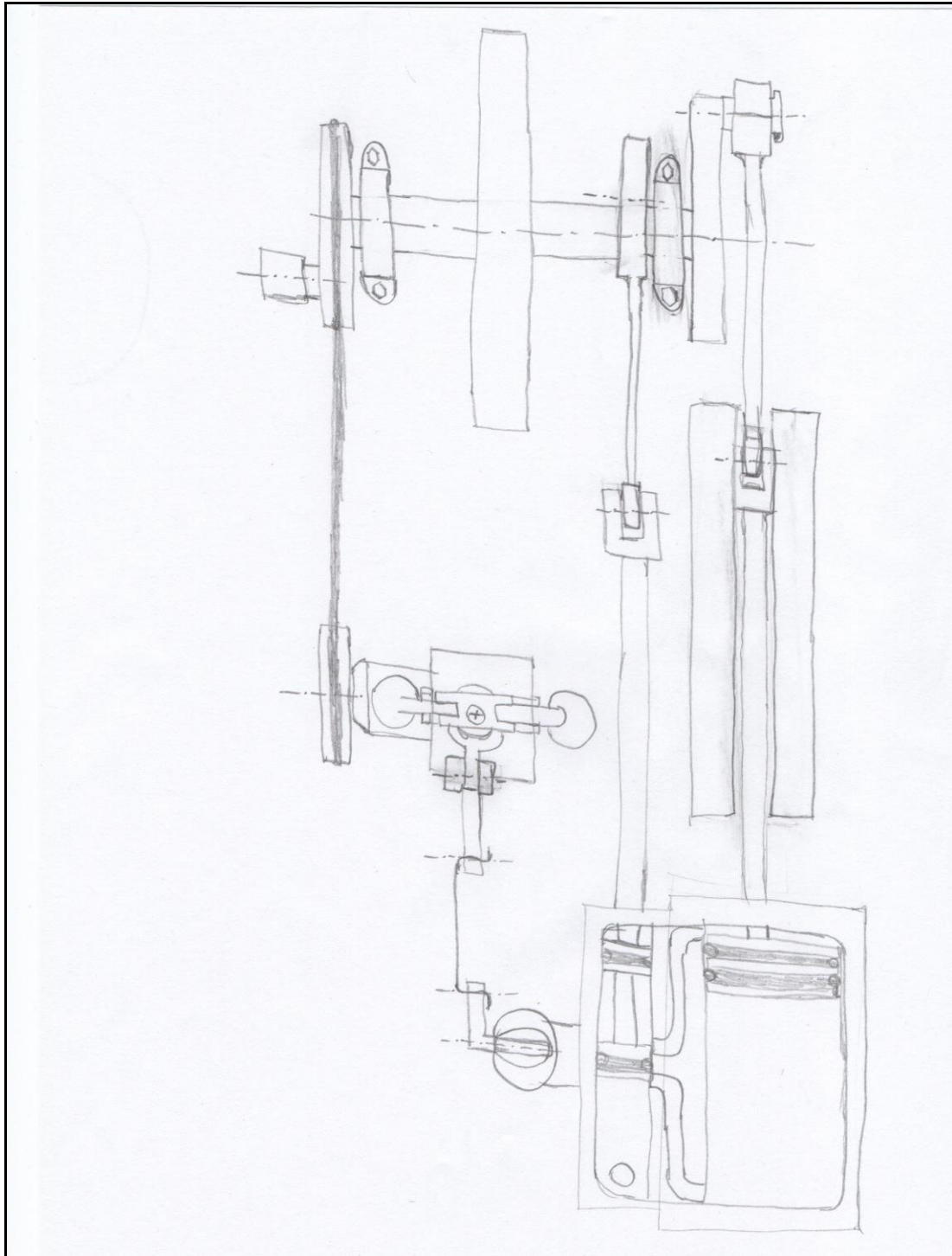


Figura 61: Croquis de la distribución en planta de la máquina de vapor [Fuente: *Elaboración propia*].

7 Diseño de la maqueta y dimensionamiento de los componentes.

El diseño de las piezas se realiza con el programa de CAD Solidworks. Se utiliza como soporte o base para la maqueta una tabla de MDF (Medium Density Fibreboard, tableros de fibras de densidad media) de 270x175mm y de 10 mm de espesor. Sobre esta base se atornillan los soportes de los distintos subensamblajes de la maqueta.

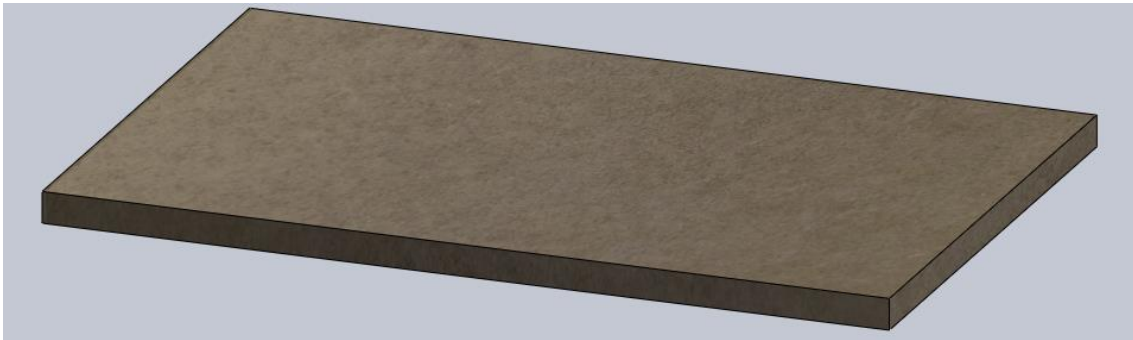


Figura 62: Base de MDF.

La máquina de vapor se divide en 3 subensamblajes: motor, eje máquina y regulador.

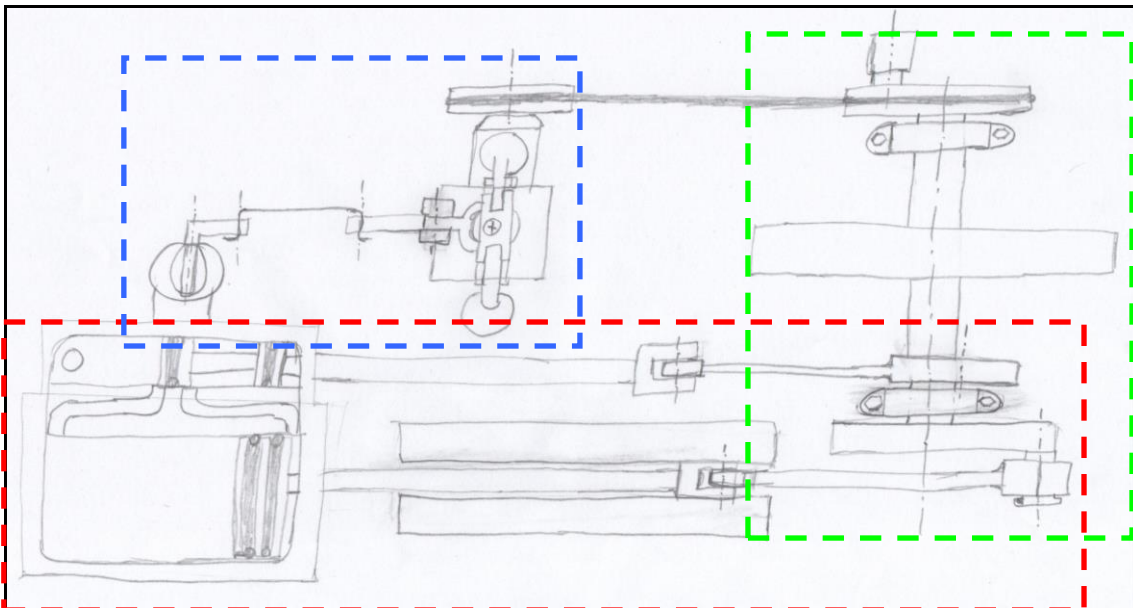


Figura 63: Croquis con los diferentes subensamblajes: motor (rojo), eje máquina (verde) y regulador (azul).

La bancada o los soportes de las máquinas de vapor estacionarias se construían principalmente de tres formas.

La primera, el cilindro, las guías y los soportes del eje se anclaban directamente al suelo.

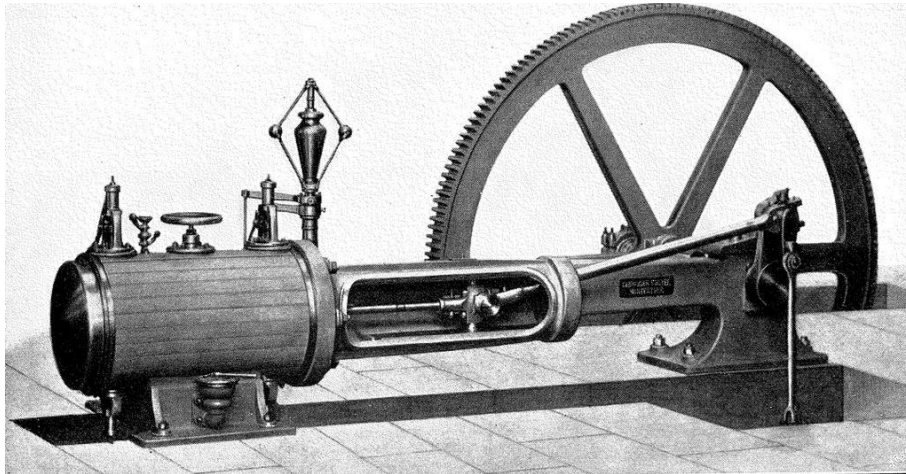


Figura 64: Máquina anclada directamente al suelo.

La segunda, el cilindro, las guías y los soportes del eje se anclaban sobre una base de hormigón o ladrillo, que elevaba la máquina del suelo. La máquina podía ir anclada directamente a esta base o ir anclada a una bancada colocada sobre la base, como se ve en la *Figura 21*.

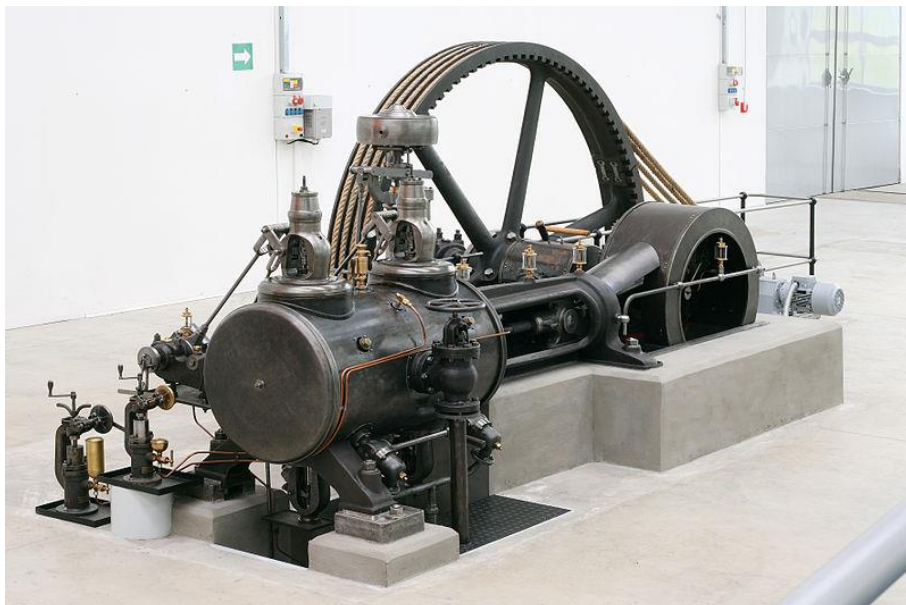


Figura 65: Máquina anclada directamente sobre base de hormigón.

La tercera, la máquina se colocaba sobre una bancada que la elevaba del suelo.

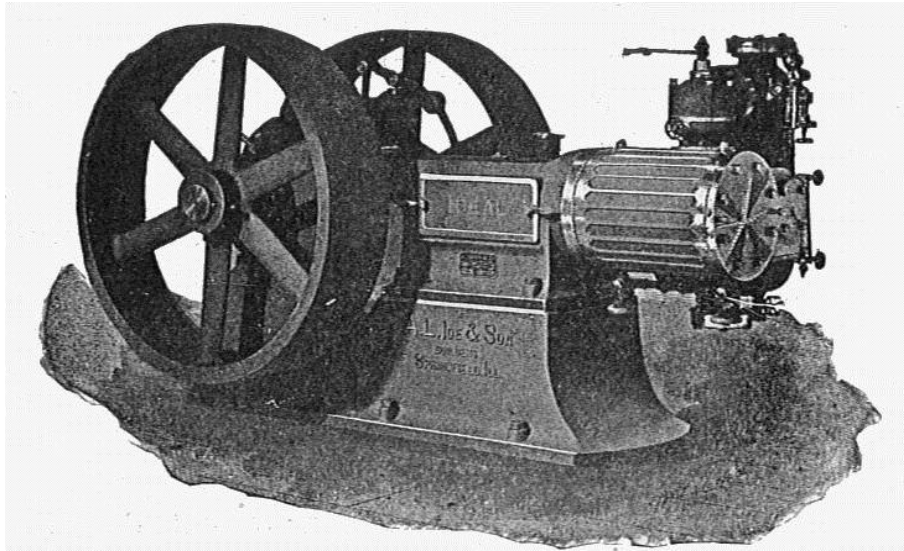


Figura 66: Máquina sobre bancada.

En diseño de la maqueta se utiliza el tercer modo, es decir, se colocan los diferentes elementos de la máquina sobre una bancada. Estas bancadas se fabricaban de fundición y presentaban laterales o patas curvos o con ángulo de salida. Para simplificar el diseño se hace una bancada con patas rectas y unos refuerzos para aportar mayor rigidez.

El soporte del regulador podía ir colocado sobre el cilindro o sobre la bancada. Pero en esta maqueta va anclado directamente a la base.

Es importante mencionar que para poder facilitar la fabricación del regulador el diseño de la maqueta no pretende estar hecho a escala de una máquina de vapor real, es decir, no mantiene las proporciones reales entre los diferentes elementos, como el caso del regulador.

En las tapas del lado de los vástagos del cilindro y de la válvula se hace un cuello imitando a sellado por prensaestopas que realmente tenían las tapas. Se hace esto porque por razones de construcción no es posible hacerlo.

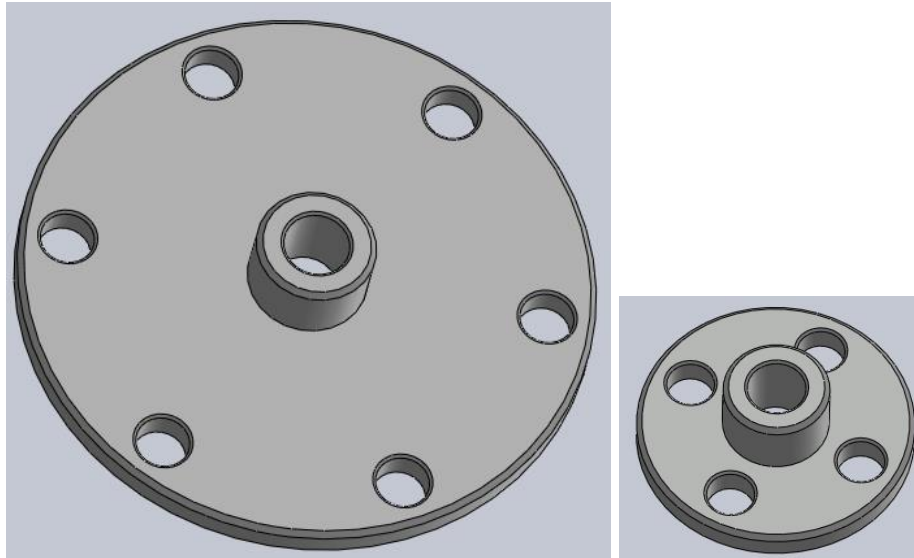


Figura 67: Tapas del lado de los vástagos de cilindro y válvula.

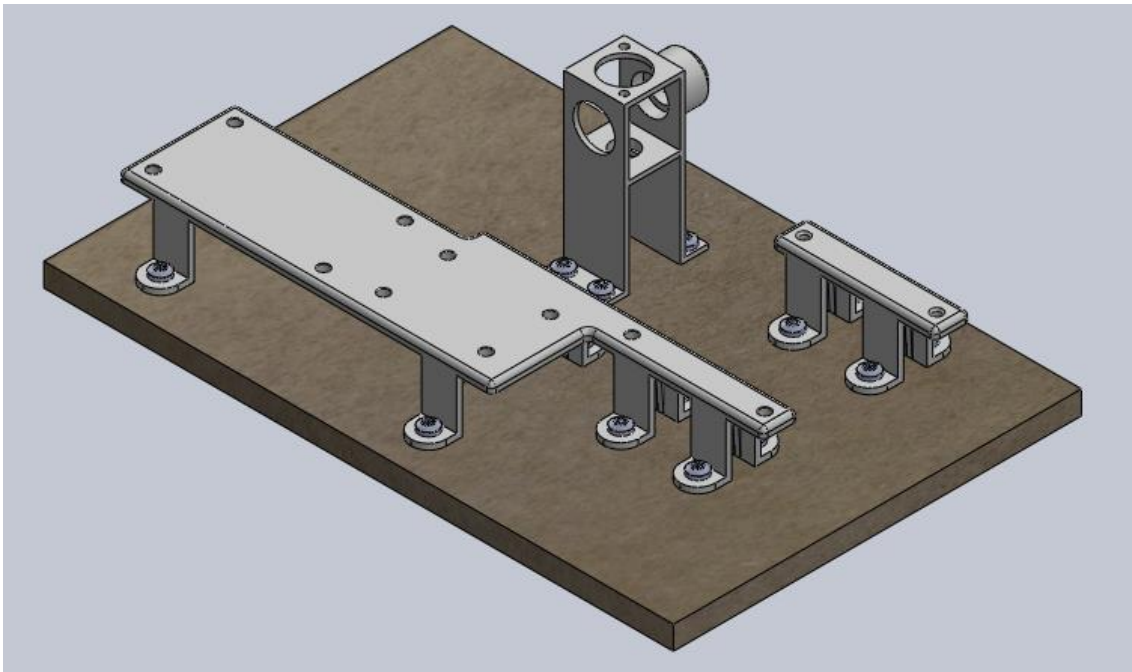


Figura 68: Diseño de la bancada y el soporte del regulador.

Para poder ver el movimiento del pistón, la válvula de distribución y la válvula de mariposa, se realiza un corte en las piezas para poder ver el interior.

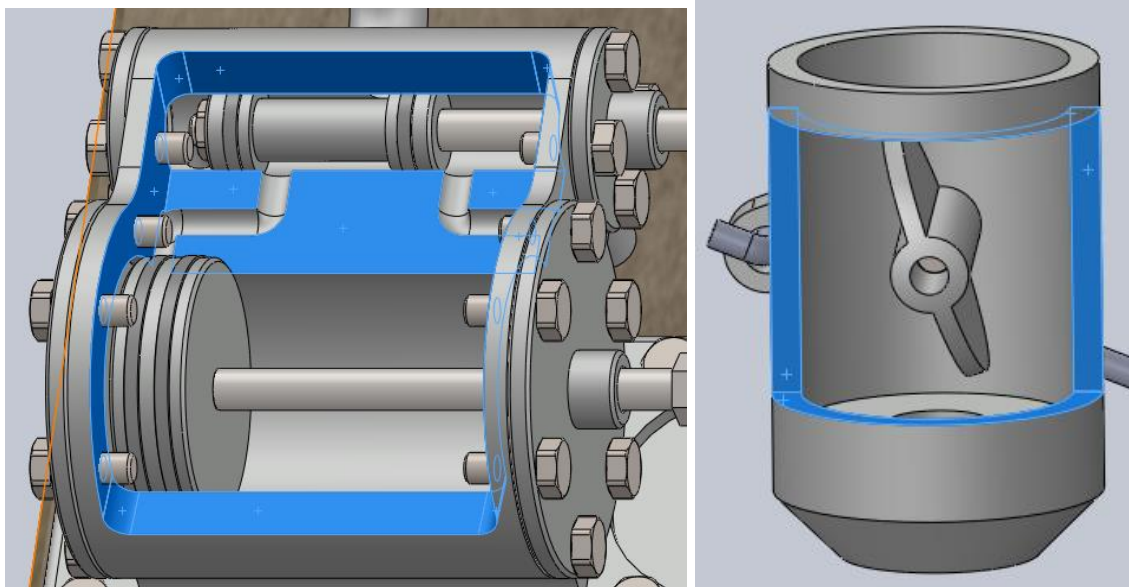


Figura 69: Cilindro-válvula de distribución (izquierda) y conducto de admisión (derecha) seccionados, corte en azul.

7.1 Diseño de los mecanismos

A continuación se detalla las dimensiones más importantes para el diseño de los mecanismos.

7.1.1 Biela-manivela

Se decide dar al cilindro un diámetro de 34mm y una carrera de 41mm. Por tanto la manivela debe tener un radio de 20.5mm.

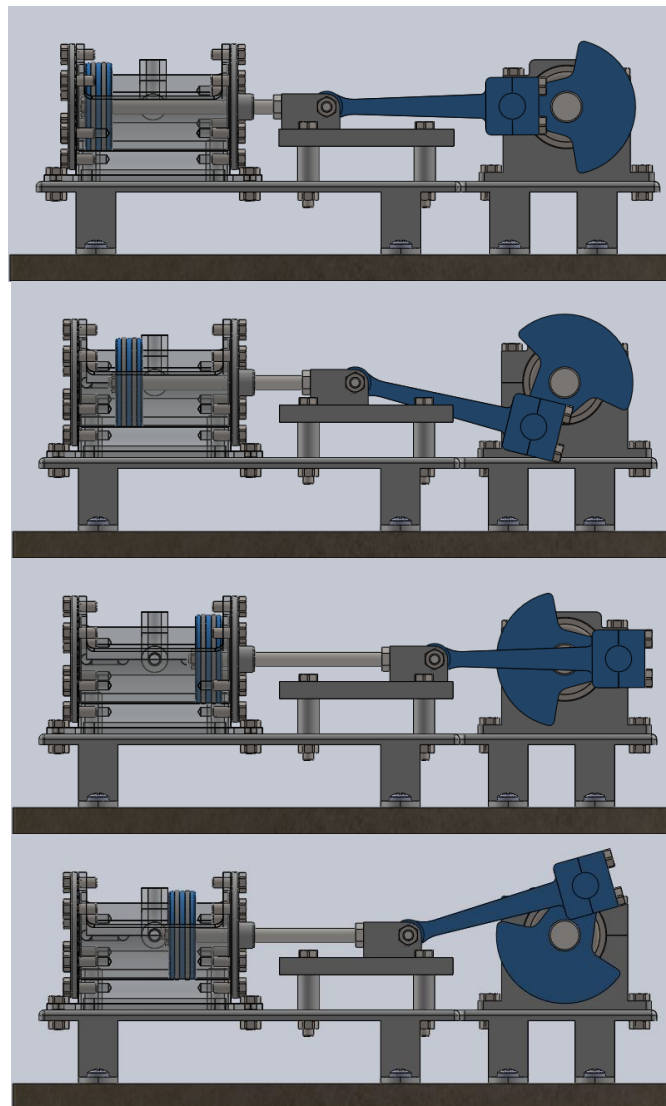


Figura 70: Secuencia de movimiento del mecanismo biela-manivela. En azul el pistón, la biela-sombbrero y la manivela.

Para el cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

L = carrera

R = radio manivela (distancia entre eje manivela y eje de la muñequilla)

$$L = 2 \cdot R$$

Ecuación 1

7.1.2 Biela-excéntrica

Se le da a la válvula de pistón un diámetro de 12mm. Para diseñar la válvula del pistón hay que tener en cuenta que la longitud de la parte central y de las cabezas esta condicionada por la distancia y el diámetro de las tomas de admisión y escape de vapor, también el diámetro de los conductos que van de la válvula al cilindro y su separación.

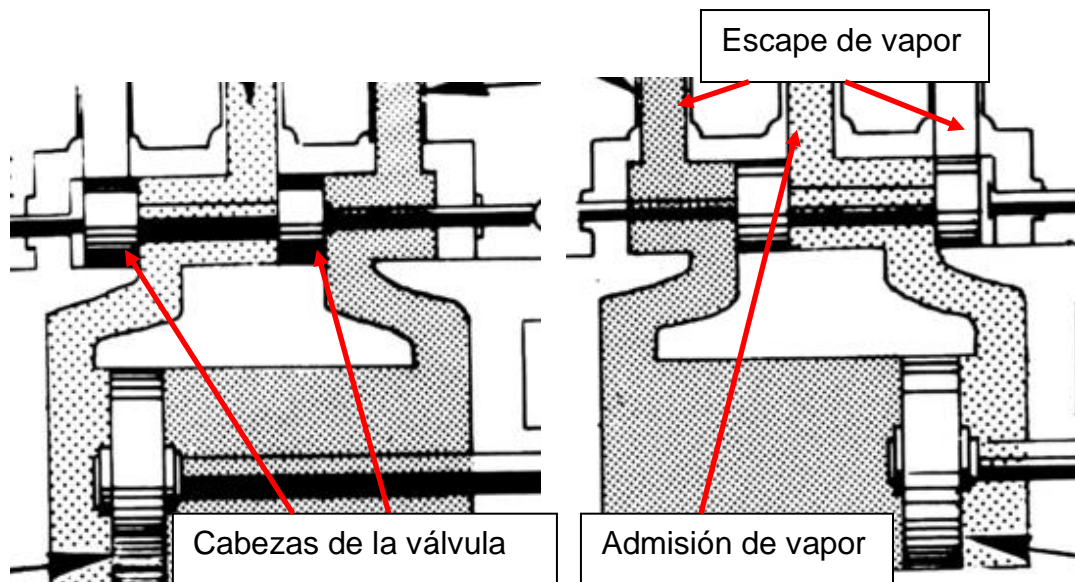


Figura 71: Partes de la válvula de pistón ^[61].

El diámetro (d) de las tomas de admisión y los conductos que van de la válvula al cilindro es de 4mm. Las tomas de escape son de 5mm.

Las dimensiones entre los conductos de la válvula son las siguientes (ver figura 71):

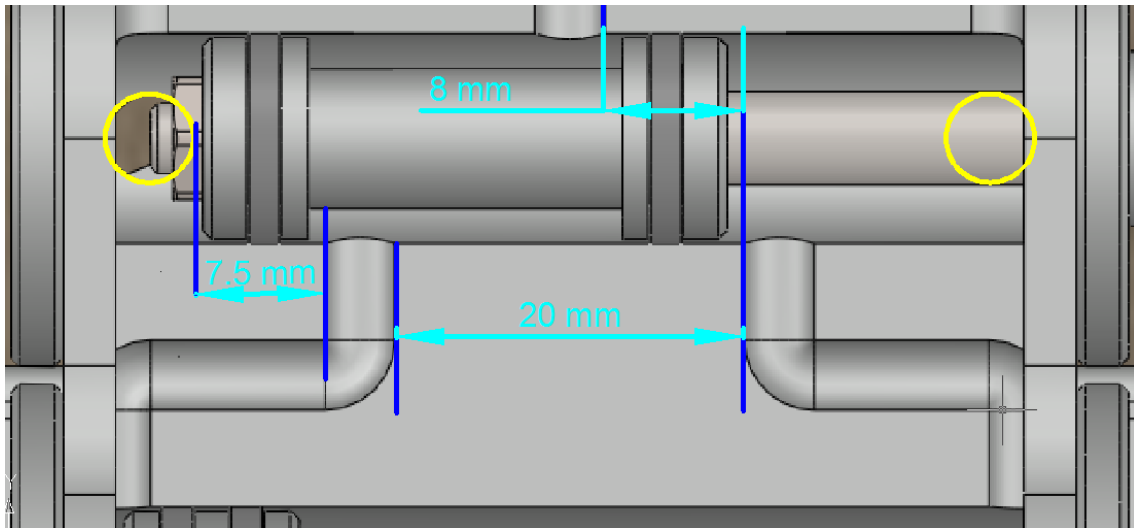


Figura 72: Dimensiones entre los conductos de la válvula.

Con estas dimensiones se decide la longitud máxima de la cabeza de la válvula de pistón (c).

n = distancia entre escape y conducto que va al cilindro. n = 7.5 mm

m = distancia entre admisión y conducto que va al cilindro. m = 8 mm

ñ = distancia entre los conductos que van al cilindro. ñ = 20 mm

$$c \leq n = c \leq 7.5 \text{ mm} \quad \text{y} \quad c \leq m = c \leq 8 \text{ mm}$$

Ecuación 2

Por lo tanto la longitud máxima que puede tener la cabeza de la válvula de pistón es 7.5mm.

Con este dato se elige la carrera de la válvula de pistón:

X = carrera válvula

$$X = n \cdot + d = 7.5 + 4 = 11.5 \text{ mm}$$

Ecuación 3

$$X = m \cdot + d = 8 + 4 = 12 \text{ mm}$$

Ecuación 4

Se escoge el valor mas grande ($X = 12 \text{ mm}$) para evitar la obstrucción parcial de los conductos.

A la parte central de la válvula se le da un diámetro menor que al de las cabezas para permitir el paso de vapor (8 mm). La longitud minima de la parte central de la válvula (B) se calcula con la siguiente ecuación:

$$B = \tilde{n} \cdot d - m = 20 + 4 - 8 = 16 \text{ mm}$$

Ecuación 5

Para darle un poco de margen se decide hacer la válvula de pistón con una longitud de cabeza de 6 mm y una longitud en la parte central de 18 mm.

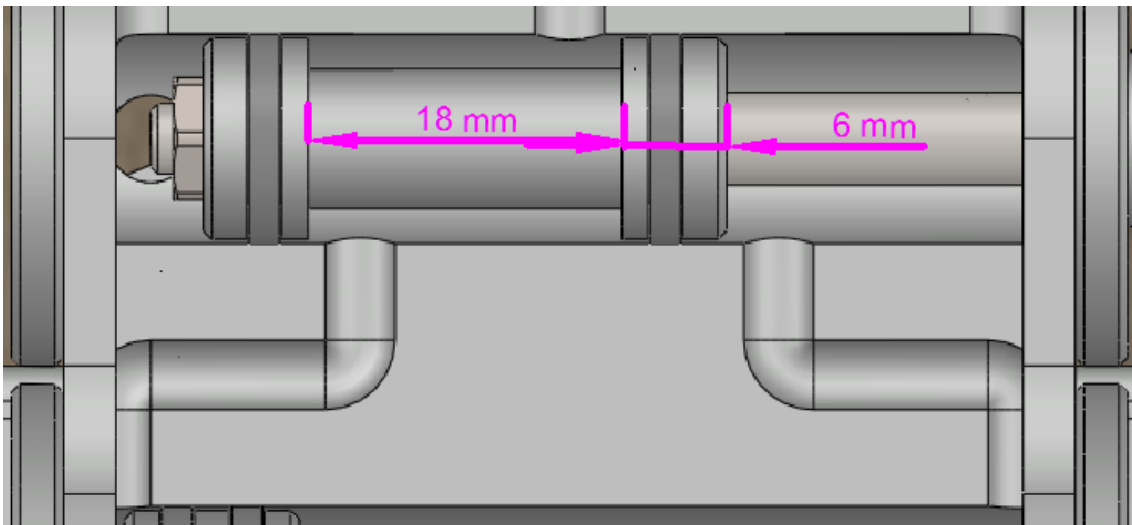


Figura 73: Dimensiones seleccionadas para la válvula de pistón.

De forma similar al mecanismo biela-manivela se calcula la excentricidad necesaria para la carrera de la válvula.

r = excentricidad (distancia entre eje de la máquina y eje de la excéntrica)

$$X = 2 \cdot r$$

Ecuación 6

Por lo tanto la excentricidad debe ser de 6 mm.

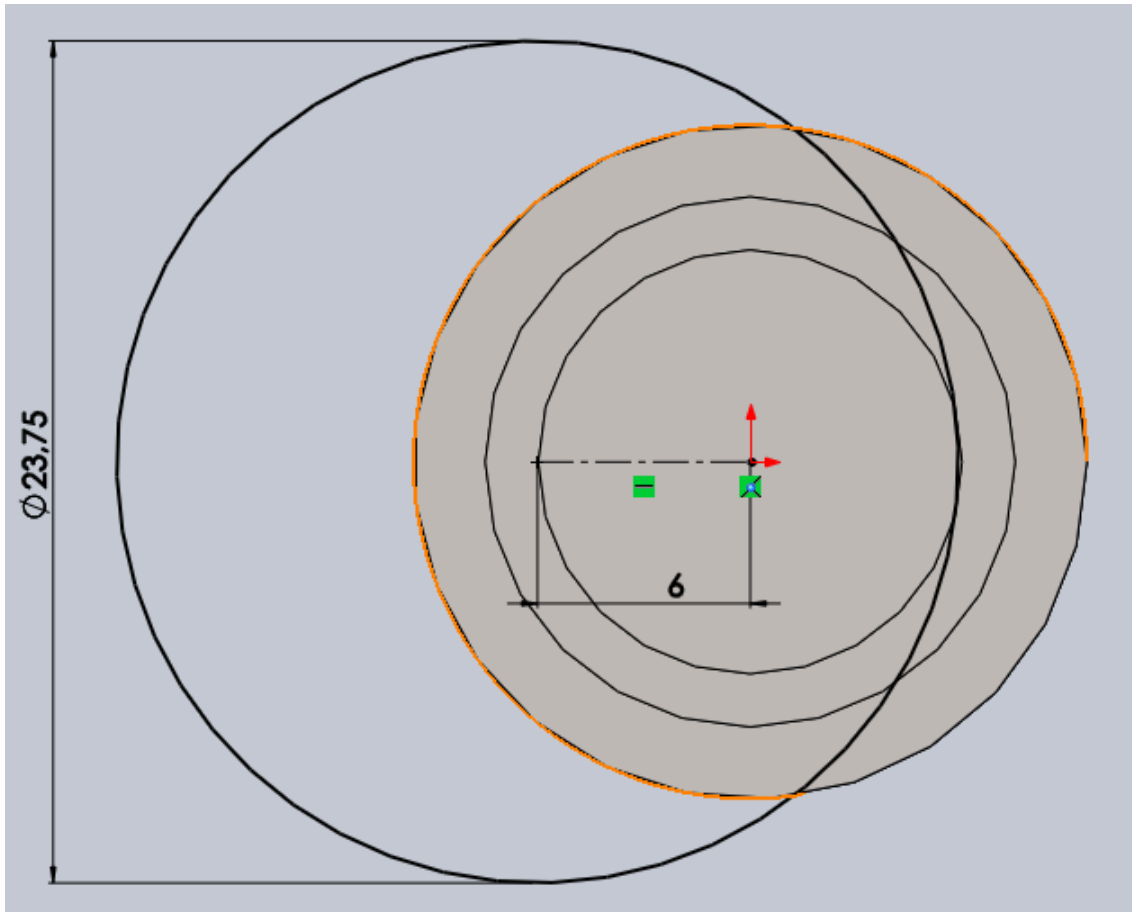


Figura 74: Distancia de la excéntrica.

7.1.3 Polea del regulador centrífugo

Para transmitir el movimiento del eje al regulador se utiliza un sistema de poleas.

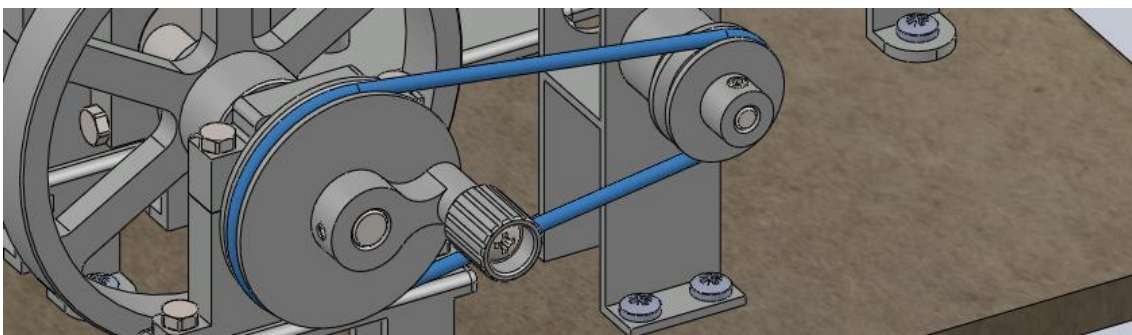


Figura 75: Sistema de poleas que transmite el movimiento al regulador. Correa en azul.

Para que el regulador gire a mayor velocidad el sistema es multiplicador, es decir, la polea del regulador gira a más velocidad que la del eje. Se decide un diámetro de polea en el eje de 45mm y en el regulador de 21mm.

La relación de velocidad (i) es la siguiente:

S = Diámetro polea regulador. S = 45 mm

E = Diámetro polea eje de máquina. E = 21 mm

$$i = \frac{S}{E} = \frac{45}{21} = 2.14 \approx 2$$

Ecuación 7

Por lo tanto, el eje del regulador gira al doble de velocidad que el eje de la máquina.

7.1.4 Engranajes del regulador centrífugo

Como el regulador funciona girando sobre un eje en posición vertical es necesario convertir el giro del eje de la polea de regulador, horizontal, en vertical. Para eso se utiliza una transmisión por medio de dos engranajes cónicos.

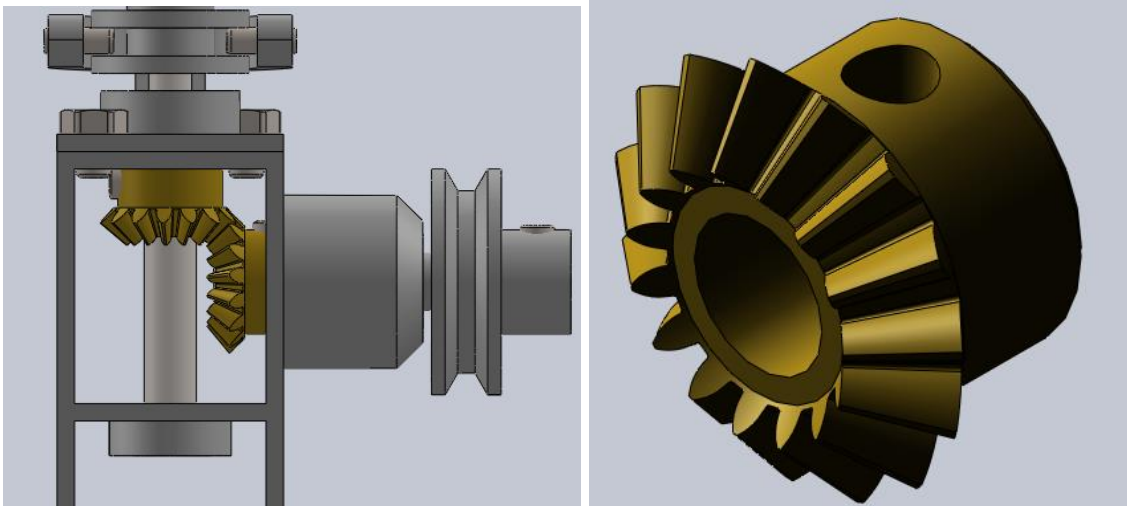
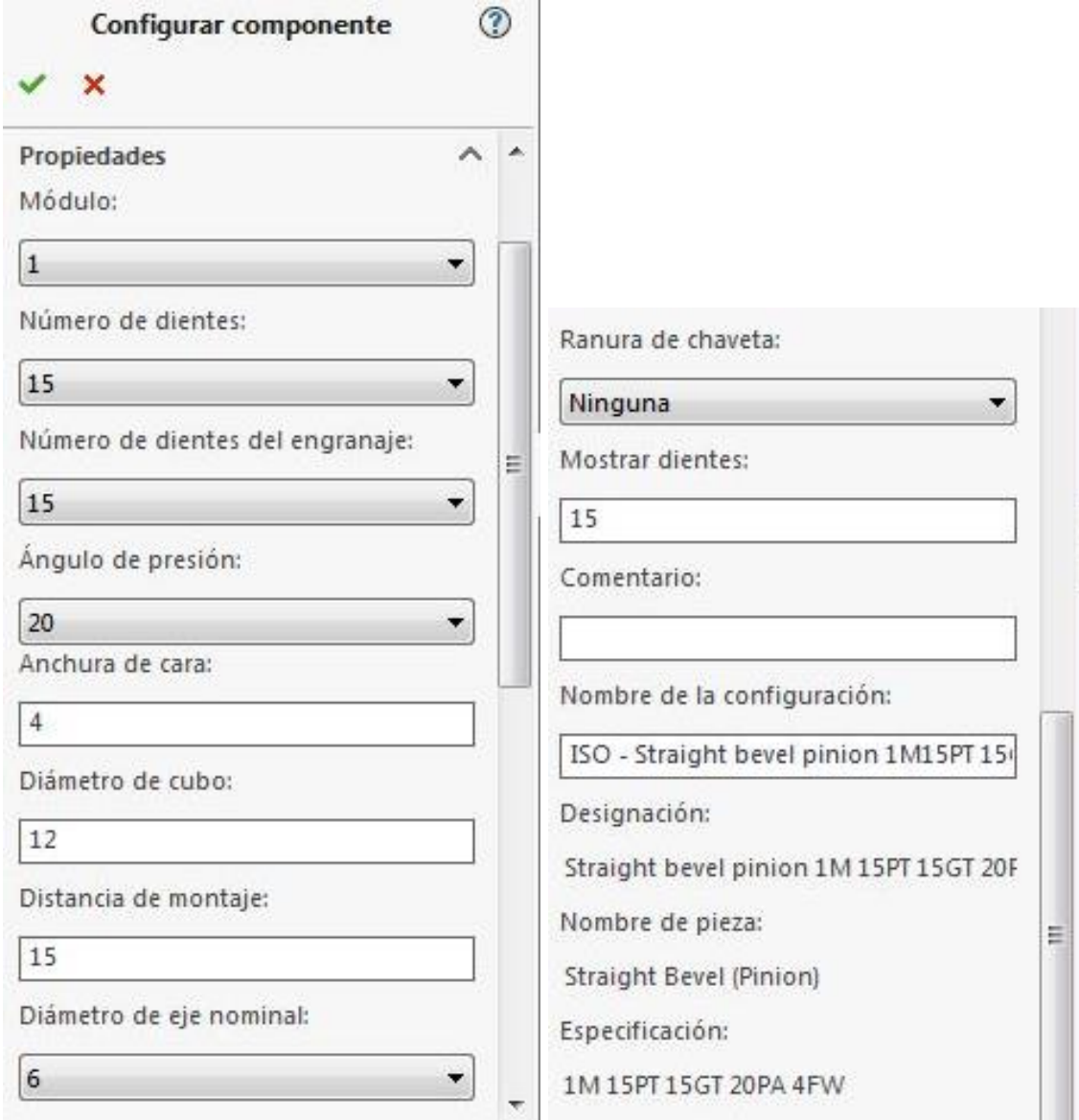


Figura 76: Transmisión de engranajes del regulador (izquierda) y engranaje (derecha).

Se utiliza un engranaje normalizado del Toolbox de Solidworks con las siguientes características:



Configurar componente

✓ ✗

Propiedades

Módulo:
1

Número de dientes:
15

Número de dientes del engranaje:
15

Ángulo de presión:
20

Anchura de cara:
4

Diámetro de cubo:
12

Distancia de montaje:
15

Diámetro de eje nominal:
6

Ranura de chaveta:
Ninguna

Mostrar dientes:
15

Comentario:

Nombre de la configuración:
ISO - Straight bevel pinion 1M15PT 15

Designación:
Straight bevel pinion 1M 15PT 15GT 20F

Nombre de pieza:
Straight Bevel (Pinion)

Especificación:
1M 15PT 15GT 20PA 4FW

Figura 77: Configuración del engranaje seleccionado del Toolbox de Solidworks.

Posteriormente se modifica el engranaje y se le añade un agujero roscado de M4 para poder fijarlo al eje.

7.1.5 Regulador centrífugo

Se diseña un regulador centrífugo que mediante un sistema de barras acciona la válvula de mariposa, cerrando el conducto de admisión cuando el eje de la máquina alcanza un número de revoluciones determinado

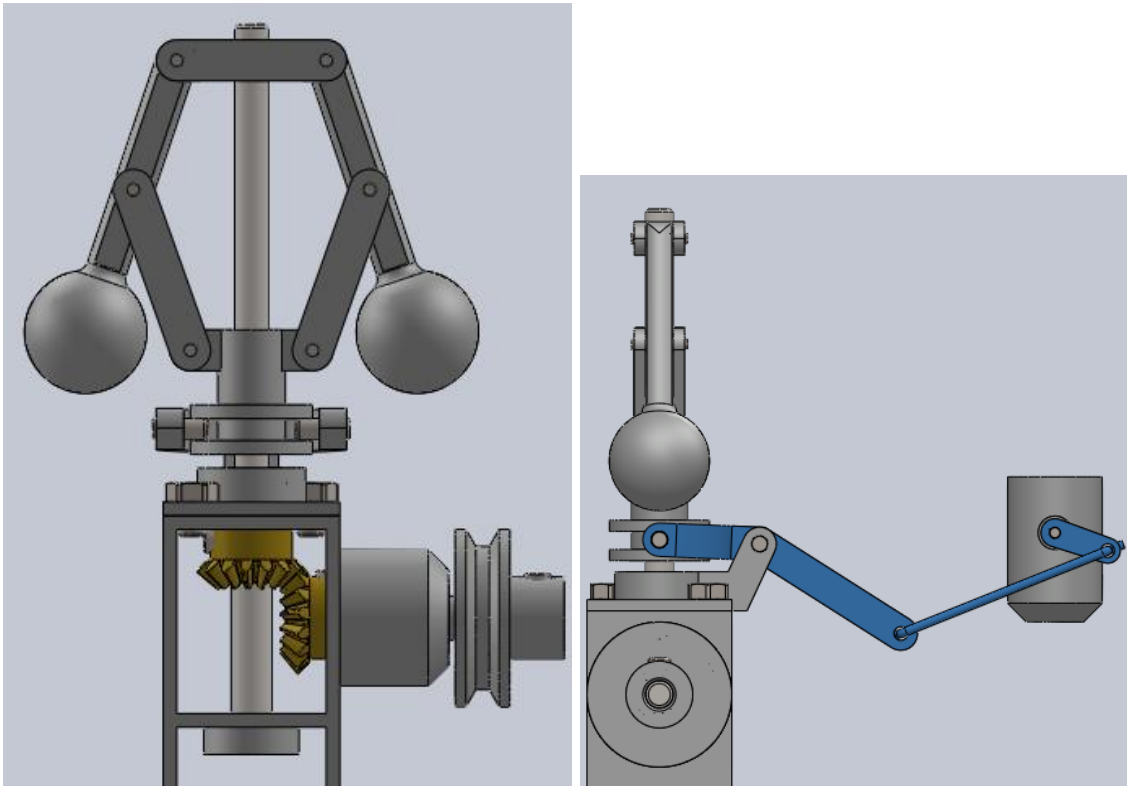


Figura 78: Vista frontal de regulador centrífugo diseñado (izquierda) y vista lateral de regulador con el sistema de barras que acciona la mariposa en azul (derecha).

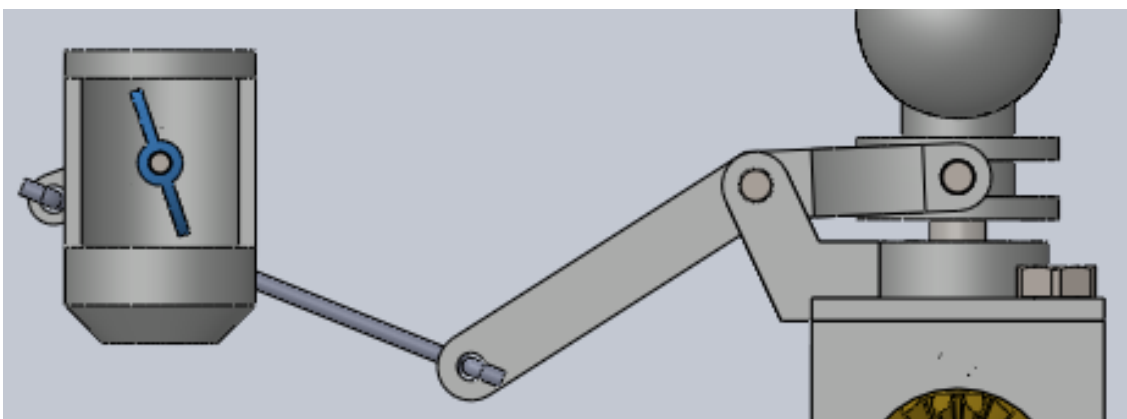


Figura 79: Vista lateral del regulador centrífugo donde se aprecia la válvula de mariposa en azul.

Se realiza un cálculo aproximado que relaciona el desplazamiento vertical de la manga con el número de revoluciones.

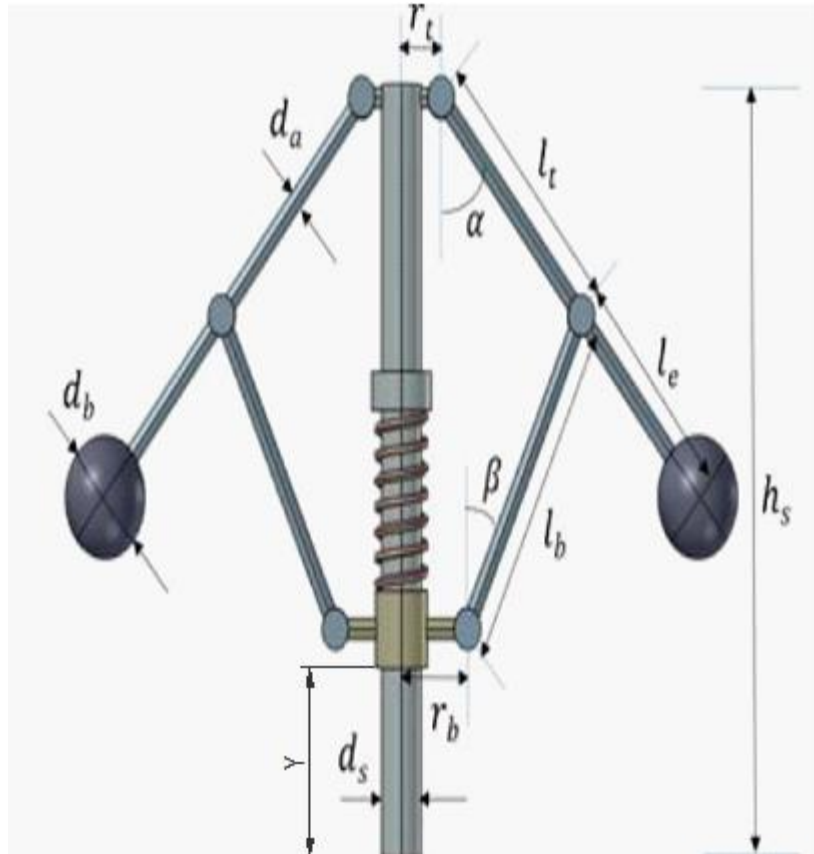
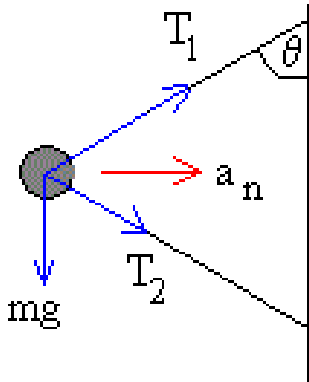


Figura 80: Regulador centrífugo acotado ^[62].

Para facilitar el cálculo se hacen una serie de simplificaciones:

- El peso de los brazos está concentrada en el centro de las esferas.
- El peso de los eslabones es despreciable.
- Las dimensiones $r_t=r_b=0$, $l_b=l_t=l_e=l$ y por tanto los ángulos $\alpha=\beta=\theta$.
- No existe rozamiento.

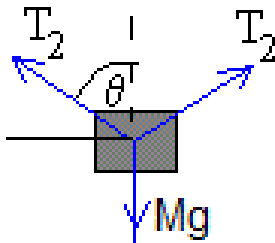
Se calcula el equilibrio de fuerzas en la unión del brazo con el eslabón



$$\begin{aligned} T_1 \sin \theta + T_2 \sin \theta &= m \omega^2 R \\ T_1 \cos \theta &= T_2 \cos \theta + mg \end{aligned}$$

Ecuación 8

Se calcula el equilibrio de fuerzas en la manga.



$$2T_2 \cos \theta = Mg$$

Ecuación 9

Por geometría se obtiene las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} h_s - 2l \cos \theta &= Y \\ R &= 2l \sin \theta \end{aligned}$$

Ecuación 10

Operando con las ecuaciones anteriores se obtiene la ecuación que relaciona la velocidad angular con la distancia Y.

$$Y = h_s - \frac{Mg + mg}{m \omega^2}$$

Ecuación 11

Con los datos de la maqueta se calcula el rango de velocidad en el que actúa el regulador.

$$H_s = 42.5\text{mm} \quad m = 25.7 \text{ g} \quad M = 13.88 \text{ g} \quad Y (0-7\text{mm})$$

$$Y(0) \rightarrow \omega = 18.8 \text{ rad/s} \approx 180 \text{ r.p.m. min en eje regulador}$$

$$Y(7) \rightarrow \omega = 20.6 \text{ rad/s} \approx 197 \text{ r.p.m. max en eje regulador}$$

Esto quiere decir que el regulador comienza a cerrar la válvula de mariposa a partir de 180 r.p.m. y en 197 r.p.m. se cerrara por completo. Como el eje del regulador esta conectado por un sistema de poleas, anteriormente comentado, el intervalo de velocidad del eje de la máquina con el que se cierra la válvula de mariposa es de 90 r.p.m. a 99 r.p.m., es decir, la máquina podrá trabajar como máximo a 90 r.p.m. A partir de esa velocidad el regulador accionara la válvula de mariposa limitando el paso de vapor en la admisión.

Este tipo de regulador constaba también de un muelle que permitía regular el límite de revoluciones. En el caso de esta maqueta, el sistema no tiene muelle y no tiene capacidad de regulación.

7.2 Materiales de la maqueta y uniones

Las mayorías de las piezas de la maqueta se diseñan para que sean fabricadas con Zamak, una aleación de Zinc, Aluminio, Magnesio y cobre. Esta aleación tiene un punto de fusión de 386 °C y es barata, lo que la hace muy útil para fabricar piezas complejas por fundición que se utilizan en juguetes, bisutería, manillas de puertas,...

Los engranajes estarían fabricados en latón, y los ejes y vástagos en acero F-114. El pistón y la válvula de distribución tienen unos anillos de polietileno de alta densidad simulando las juntas de estanqueidad. La correa de la polea es sección circular de 3 mm de diámetro y de 275 mm de diámetro interior. Para las uniones se utilizan elementos normalizados como tirafondos, tornillos, tuercas y pasadores. También se seleccionan dos tipos de rodamientos para los ejes del regulador y para el eje de la máquina.

Las uniones se realizan por medio de tornillos y tuercas de métrica 4. Para unir la manivela, el volante de inercia y la polea que están en el eje de la máquina se utilizan tornillos prisioneros de métrica 4 y se realiza los agujeros correspondientes en el eje para fijarlos, a modo de chavetero.

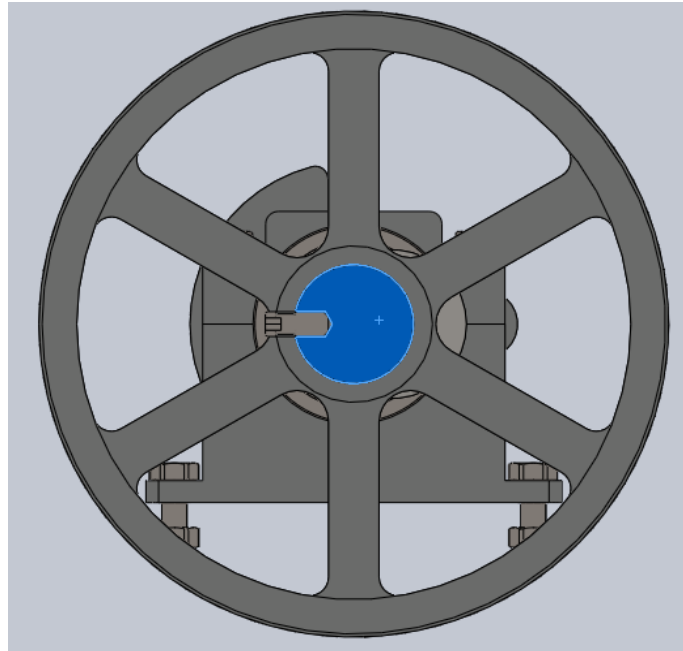


Figura 81: Detalle de fijación del volante de inercia y el eje (en azul).

En los ejes del regulador hacer los agujeros no es posible porque el diámetro de los ejes es demasiado pequeño. Se utiliza prisioneros de métrica 4 con la punta plana y se realizan unos cortes en los ejes para unir los elementos que componen el regulador centrífugo.

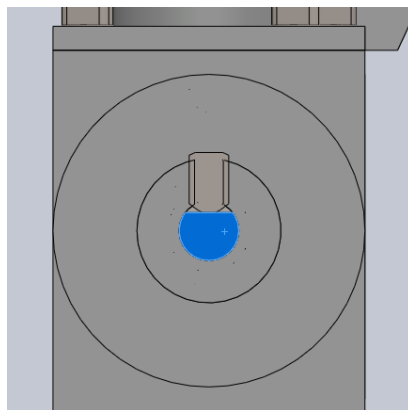


Figura 82: Detalle de fijación de la polea del regulador y el eje (en azul), corte transversal del eje.

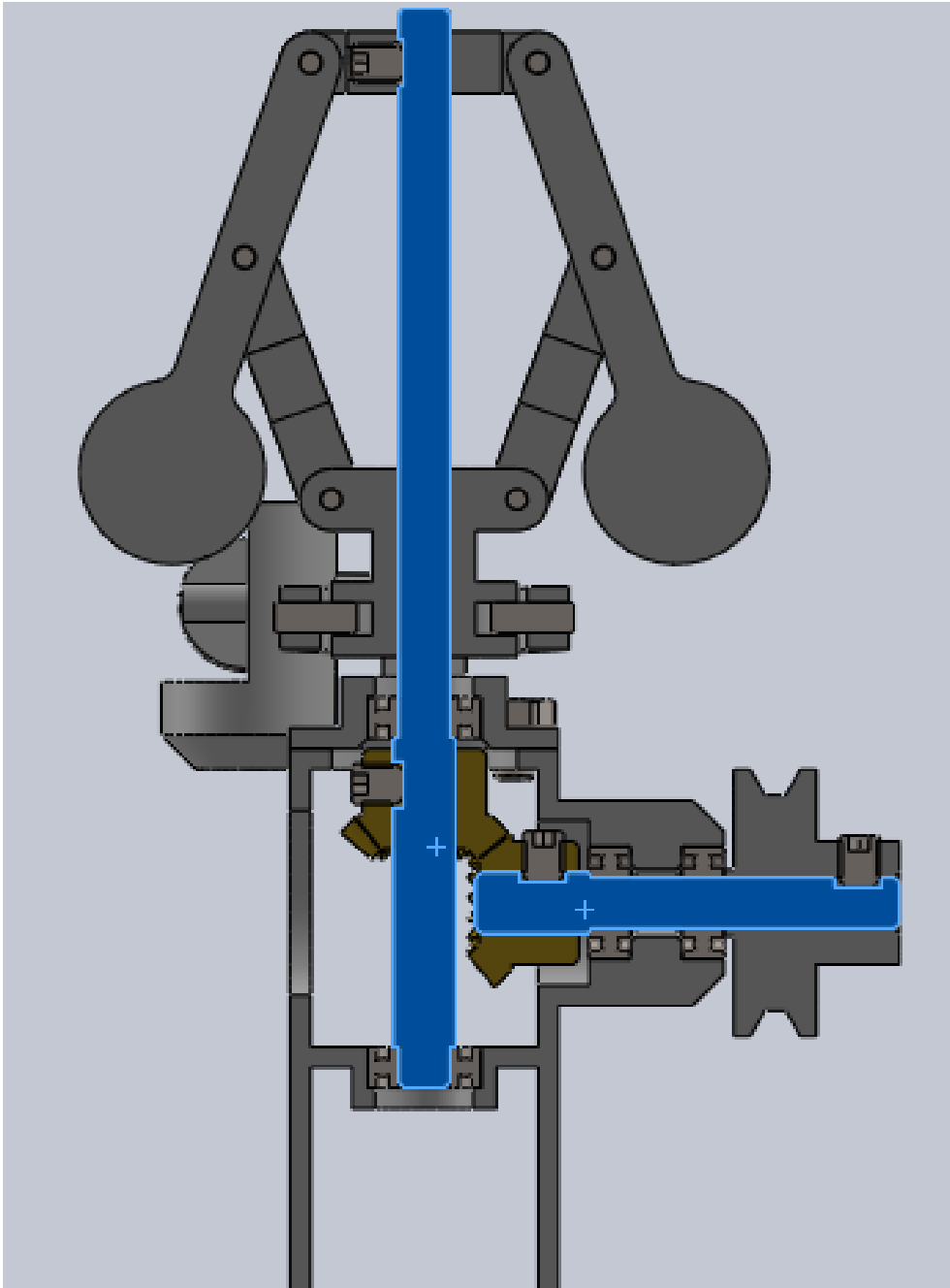


Figura 83: Detalle de fijación de diferentes elementos del regulador y los ejes (en azul), corte longitudinal de los ejes.

7.3 Diseño del accionamiento

El accionamiento manual que originalmente se quería poner en el eje de salida se simplifica y se añade una manivela a la polea del eje de la máquina, siendo parte integral de la pieza. La manivela tiene un radio de 20mm y se le añade una pequeña empuñadura fijada con un tornillo, que permite girar la manivela sin que rote la empuñadura.

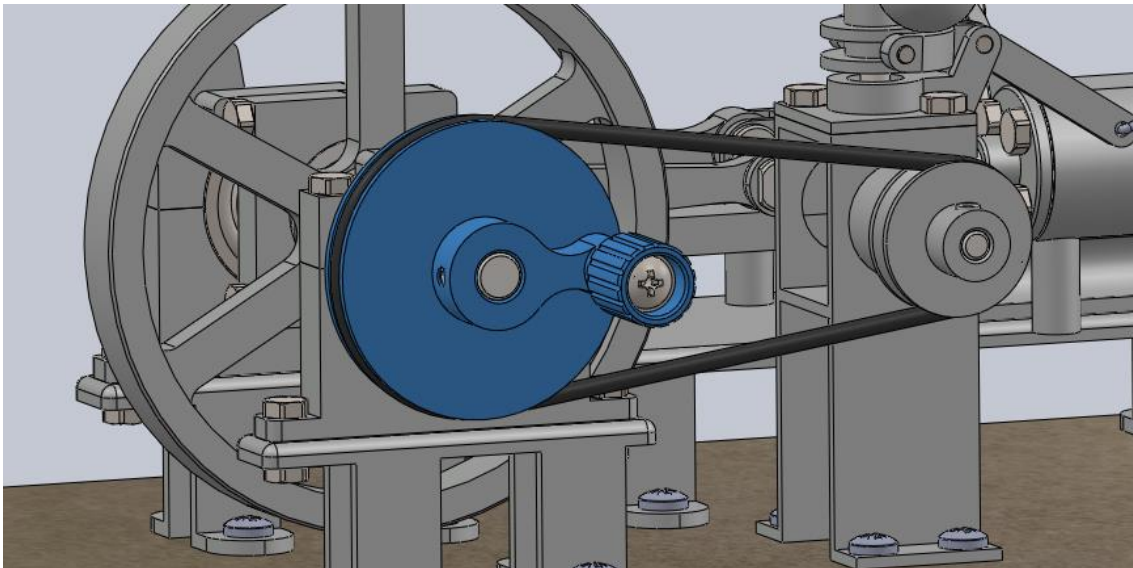


Figura 84: Manivela de accionamiento y empuñadura, en azul.

8 Proceso de fabricación del prototipo, materiales y herramientas empleadas.

El prototipo se construye sobre una base de MDF, de dimensiones 270x175mm y de espesor 3mm, sobre la que se atornilla los soportes de los subensamblajes de la máquina de vapor. Esta base se refuerza con un perímetro hecho con un listón de sección 12x12mm. Se le añaden uno pequeños tacos de goma.

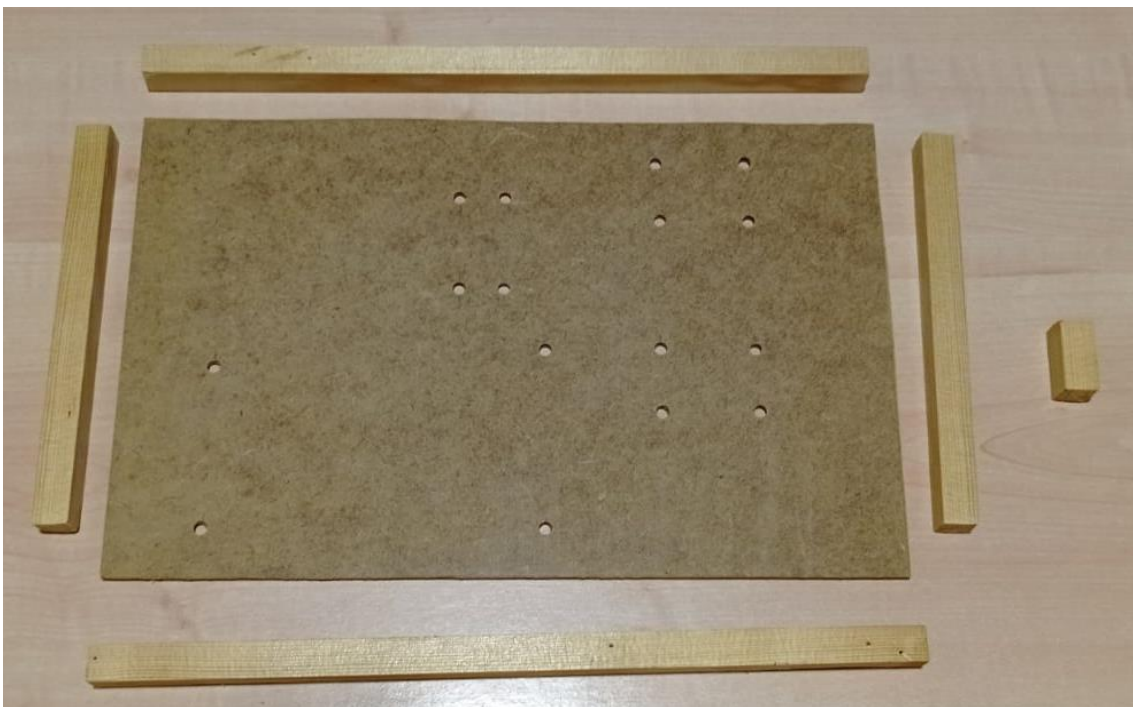


Figura 85: Base y listones de refuerzo.



Figura 86: Tacos de goma.

La fabricación de la mayoría de las piezas se realiza mediante impresión 3D, en concreto MDF (Modelado por deposición fundida). Se utiliza este proceso de fabricación principalmente para el modelado de prototipos, fabricación de piezas a pequeña escala y piezas únicas o personalizadas. Este tipo de fabricación consiste en fundir material plástico que se deposita por capas en forma de fino filamento sobre una base (cama) de la impresora 3D, consiguiendo así la geometría deseada.

El proceso comienza, una vez dibujada la pieza en Solidworks, guardando la pieza que se quiere modelar en un archivo en formato “.amf” o “.stl”. Este archivo se abre con un programa cortador de capas (slicer). En este programa se configura las características de la impresión, corta la pieza en capas y puede añadir soportes para piezas que presenten algún voladizo. Cuando se ha finalizado la configuración se guarda en un archivo en formato “.gcode”. Este tipo de archivo contiene los datos de la geometría, la configuración establecida y las trayectorias que debe realizar el cabezal de la impresora para depositar el material.

Los soportes de los subensamblajes se fabrican en la impresora de la UPNA. Esta impresora es de la marca “Markforged”, modelo “Mark Two™”. Se utiliza un programa cortador (slicer) de la propia marca de la impresora, “Eiger”.

El material con el que se imprimen estas piezas es “Onyx™”, nylon reforzado con microfibras de carbono. Es de color negro.

Las características de las piezas en el cortador son:

Pieza	Tiempo (h:min)	Relleno	Espesor capas superior e inferior (mm)	Peso (g)	Material	Precio estimado (€)
Bancada	6:13	29%	0,8	43,95	ONIX	11,62
Bancada eje	2:00	29%	0,8	9,00	ONIX	3,34
Soporte regulador	3:07	29%	0,8	13,00	ONIX	3,51

Tabla 2: Configuración de impresión de las piezas impresas en la UPNA.

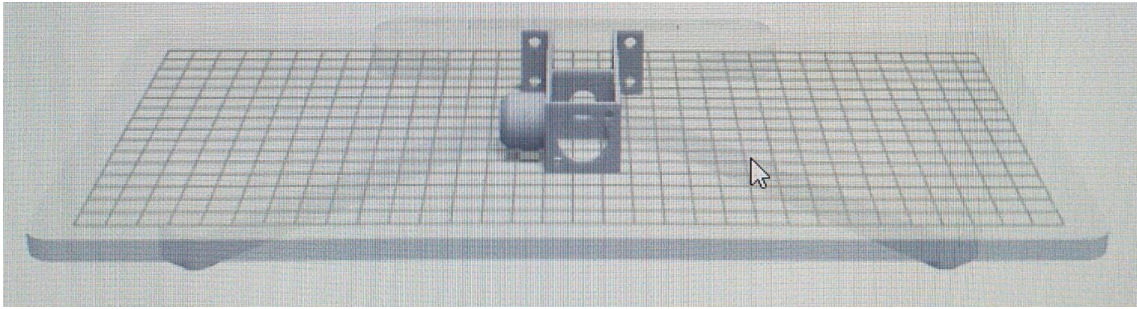


Figura 87: Soporte del regulador en el programa cortador "Eiger".

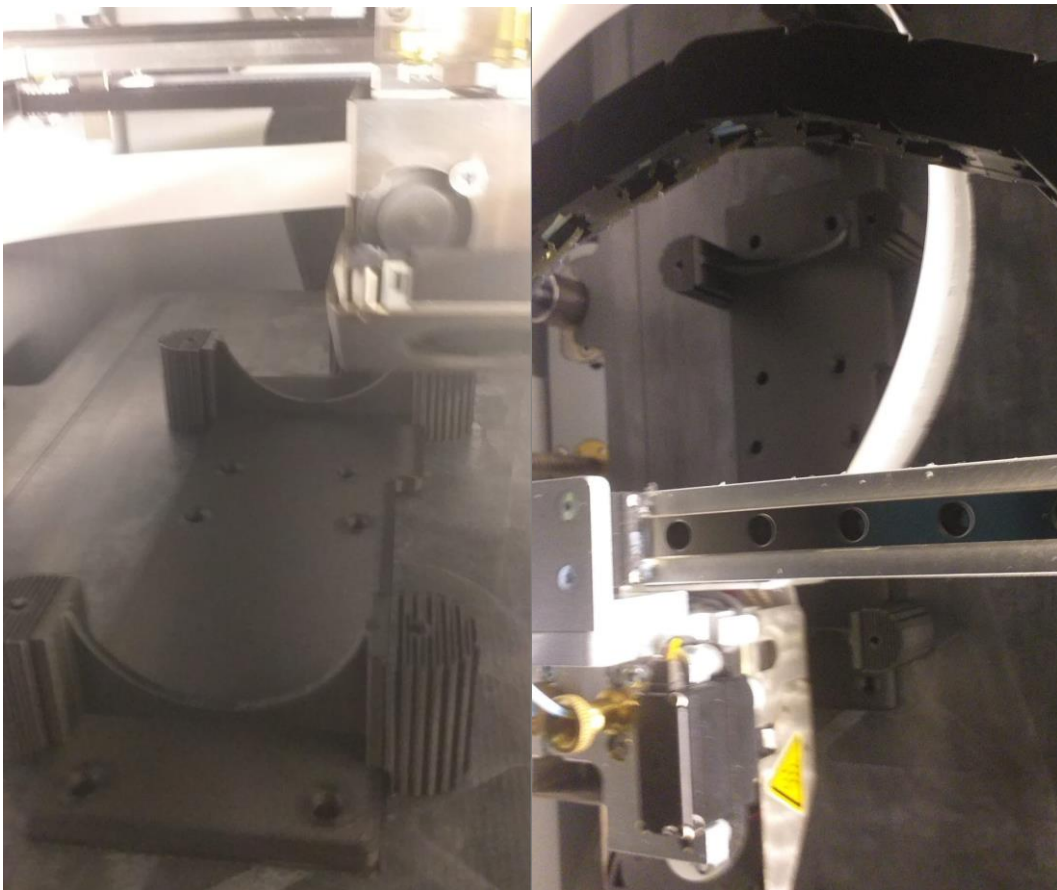


Figura 88: Fotos de la bancada durante la impresión. Puede apreciarse el material de soporte en las patas.

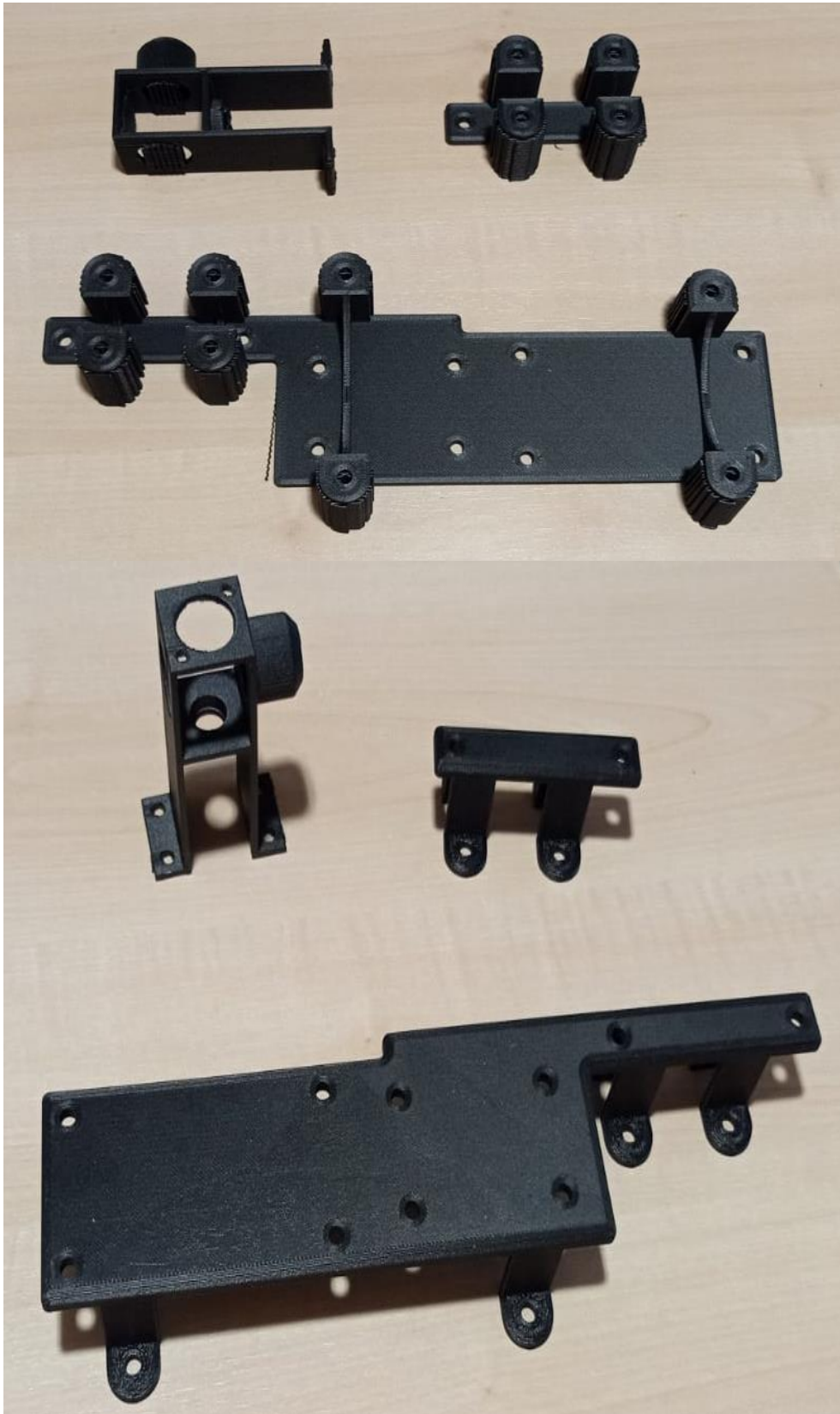


Figura 89: Piezas recién impresas con soportes (arriba) y limpias, sin soportes (abajo).

El resto de piezas se imprimen con una impresora 3D de uso domestico, no profesional. Se utiliza la impresora de la marca “Creality” modelo “Ender 5 Pro”. También se utiliza el programa cortador de la marca “Creality Slicer 1.2.3.”.

El material utilizado en estas piezas es PLA (ácido poliláctico). Se utilizan 2 colores, blanco para las piezas móviles y verde para las piezas fijas.

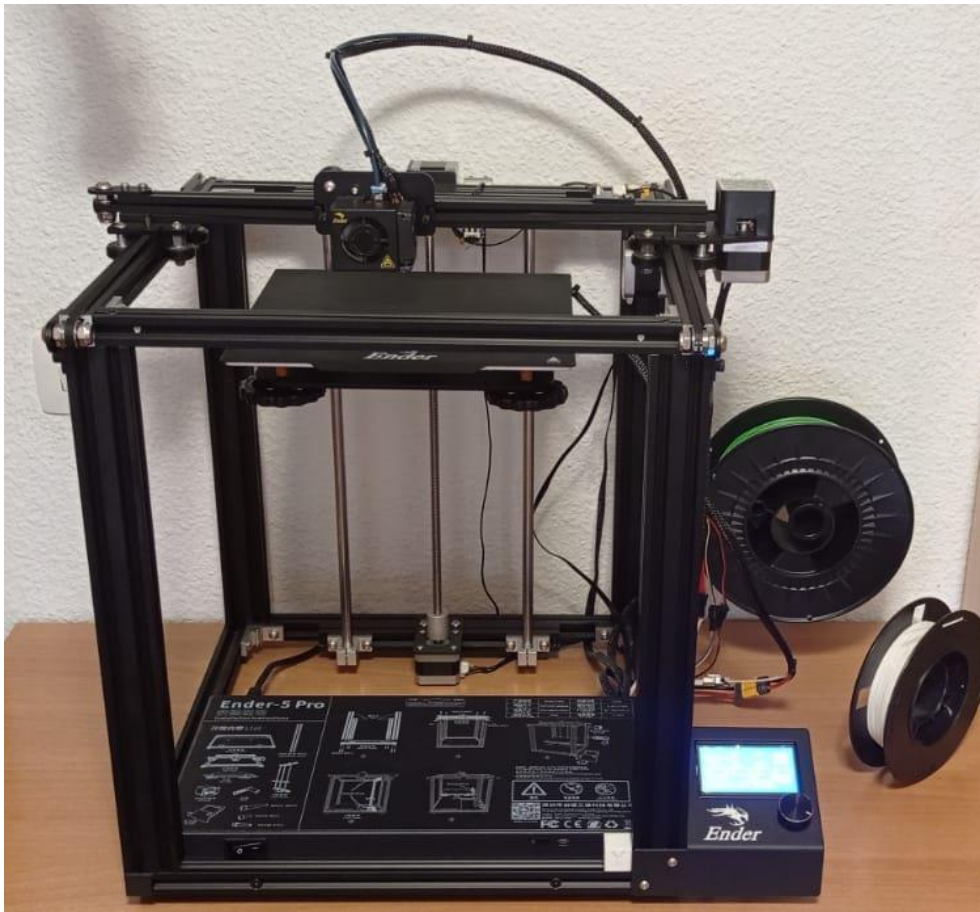


Figura 90: Impresora (Ender 5 Pro) utilizada para imprimir las piezas de PLA y rollos de filamento verde y blanco.

A la hora de configurar las piezas en el programa cortador hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Espesor de capa: Del espesor de capa dependerá la resolución de la pieza impresa. Cuanto mas fina sea la capa mayor será resolución. También tardara más tiempo en imprimir.
- Espesor de pared: Del espesor de pared dependerá la rigidez y la resistencia de la superficie externa de la pieza.
- Densidad de relleno: Las piezas son parcialmente huecas para ahorrar material y para reducir el tiempo de impresión. En el hueco interior se imprime una estructura ligera con líneas cruzadas. El porcentaje de relleno indica la cantidad de líneas que posee la estructura. Un relleno del 100% imprime una pieza maciza y un relleno de 0% imprime una pieza totalmente hueca. Cuanto mayor sea la densidad de relleno, mayor será el tiempo necesario para imprimir la pieza.
- Soportes: Son una estructura ligera que se añade en la impresión en ciertas zonas de la pieza que presentan voladizo. Se pueden colocar soportes solo desde la cama hasta el exterior de la pieza o por toda la pieza. Estos soportes se imprimen de forma que tras la impresión sean fáciles de retirar.

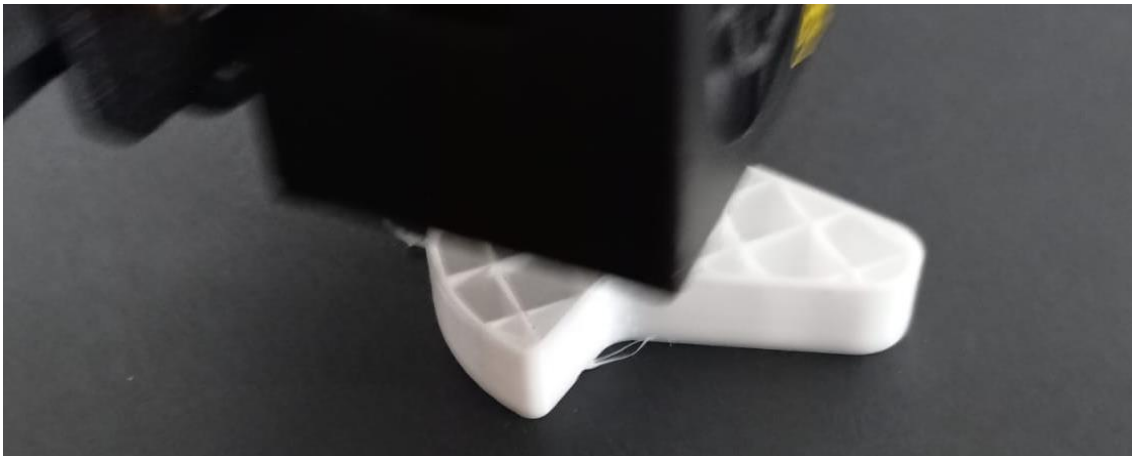
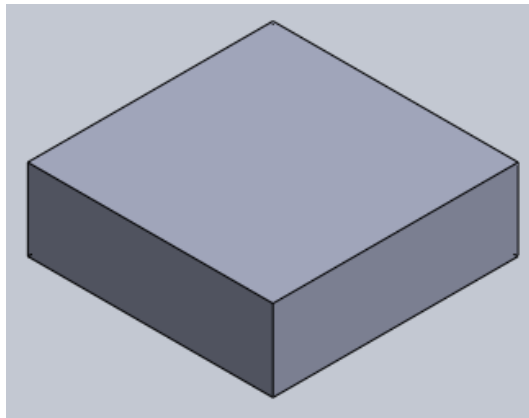


Figura 91: Detalle de la rejilla del relleno durante la impresión de la manivela.

Se imprimen las piezas con un espesor de capa de 0.2 mm, excepto los engranajes que se imprimen con un espesor de 0.15 mm para que tengan mayor precisión. El espeso de pared en todas las piezas es de 0.8mm. En cuanto a la densidad de relleno en un principio se imprimió con un 15 %, pero después se redujo al 10 % ya que las piezas presentaban resultados similares y con esto se consiguió así reducir los tiempos de impresión.

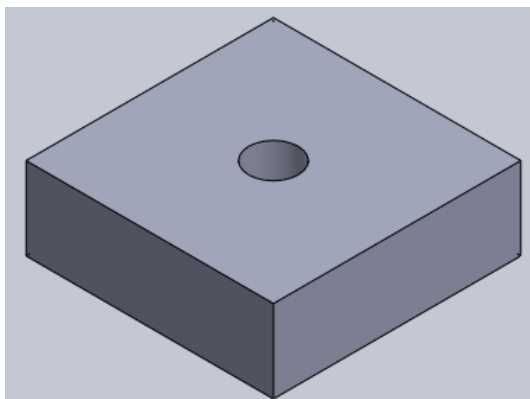
Para aligerar las piezas y reducir el tiempo de impresión, en le caso de que no sean macizas, se puede añadir radios o chaflanes pero no siempre es mejor añadir agujeros porque eso puede aumentar la superficie exterior de la pieza, que es la zona donde más material se deposita.

A continuación se muestra un ejemplo de diferentes casos de una hipotética pieza cuadrada de 30 mm de lado y 10 mm de espesor.



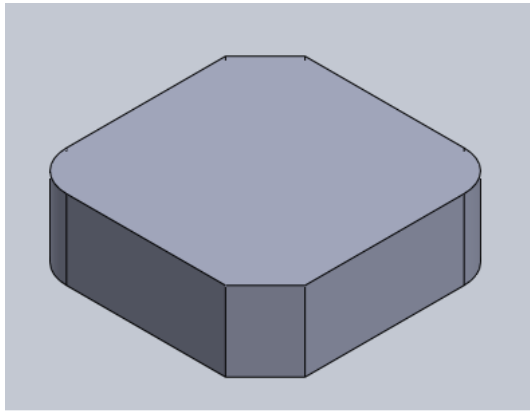
16 minutos
1.51 metros 4 gramos

Figura 92: Pieza hipotética original y datos del programa cortador.



17 minutos
1.52 metros 5 gramos

Figura 93: Pieza hipotética con agujero de \varnothing 6 mm y datos del programa cortador.



15 minutos
1.44 metros 4 gramos

Figura 94: Pieza hipotética con radios y chaflanes de 5 mm y datos del programa cortador.

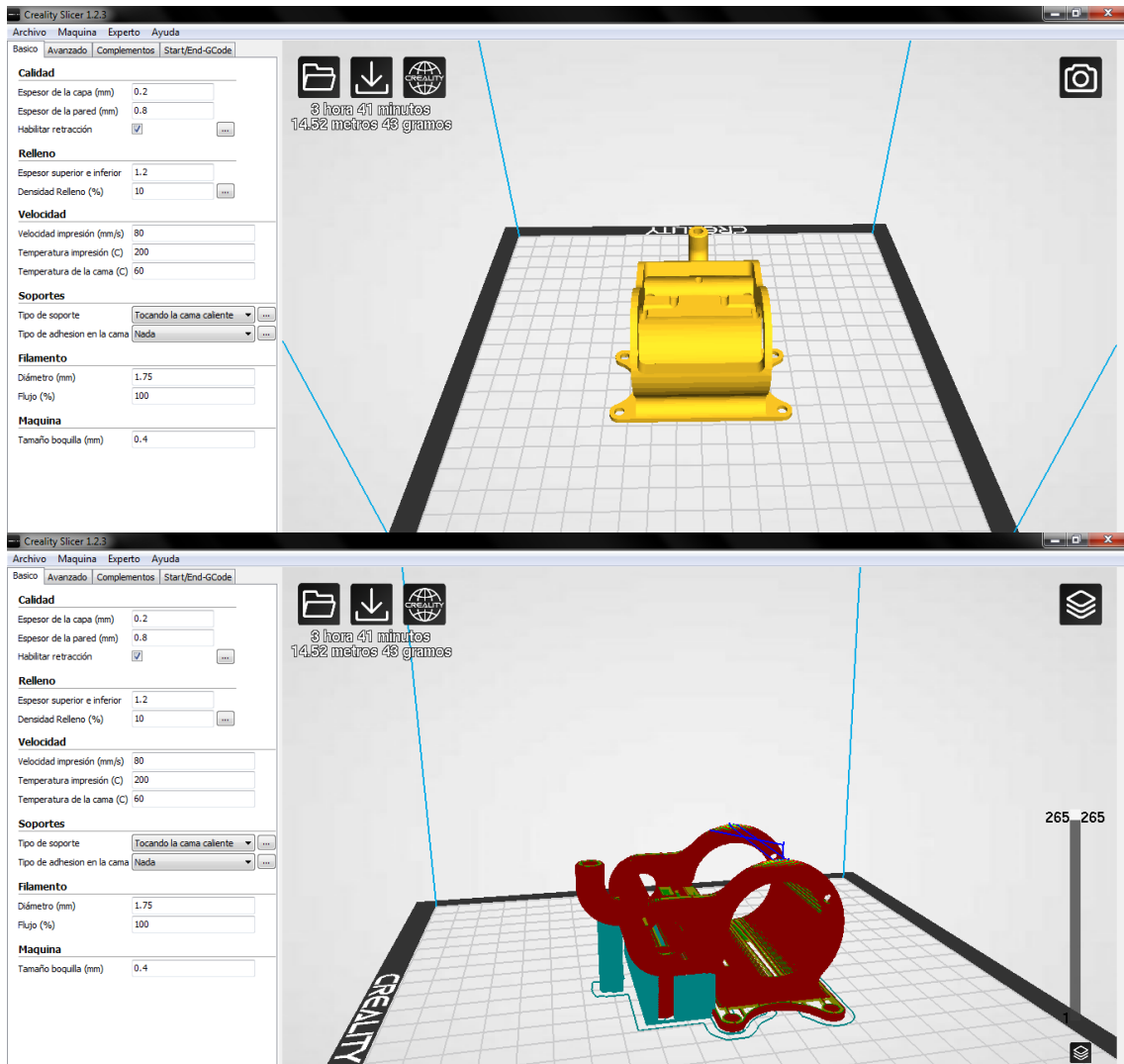


Figura 95: Imágenes de la pieza Cilindro-Válvula en el programa cortador “Creality Slicer 1.2.3.”, abajo la pieza cortada en capas, los soportes en azul claro.

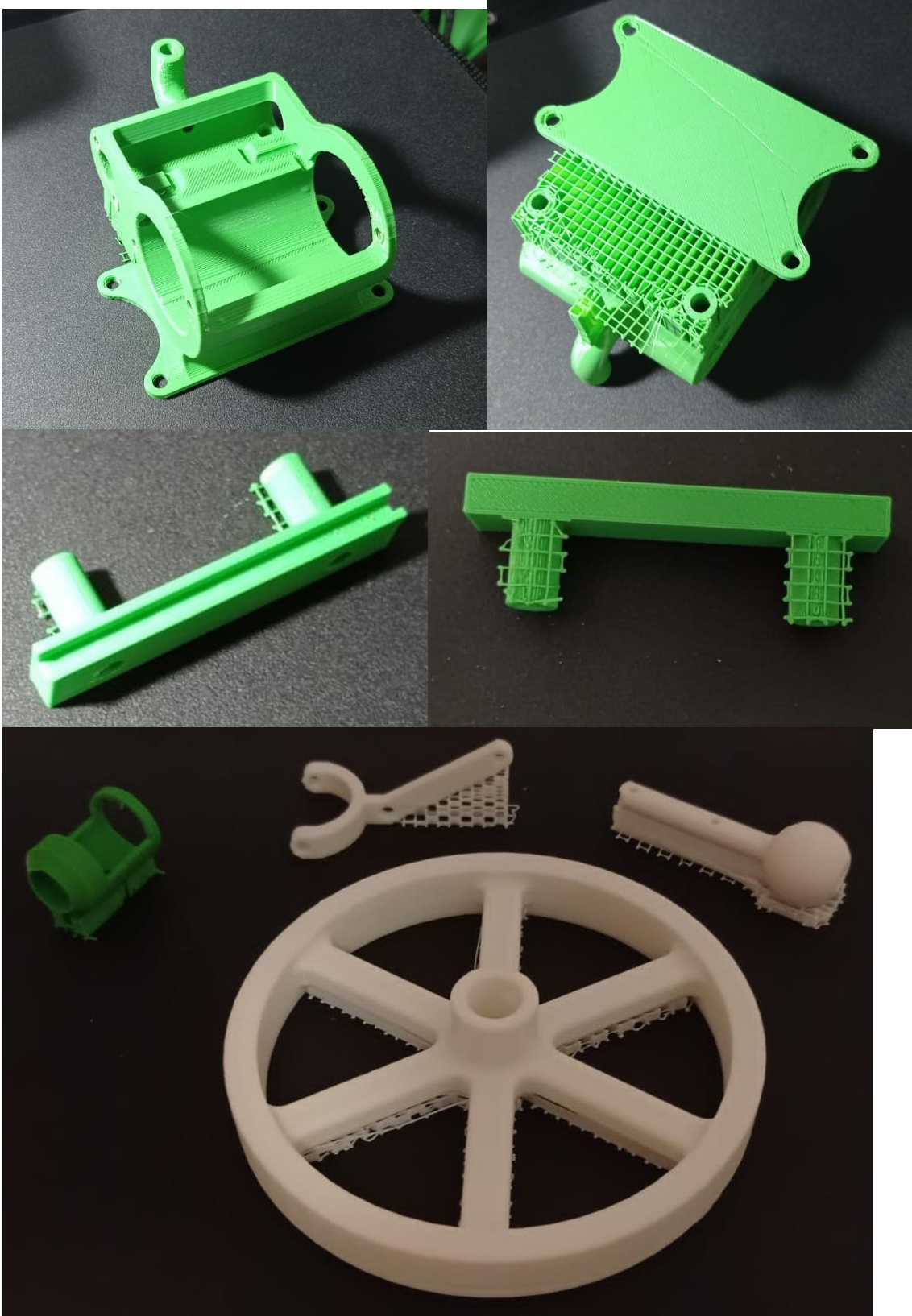


Figura 96: Ejemplos de piezas con estructura de soporte.

Pieza	Material	Espesor de la capa (mm)	Espesor de la pared (mm)	Densidad de Relleno (%)	Soportes	Tiempo estimado (h: min)	Longitud estimada (m)	Peso estimado (g)
3D-Cabeza_Vastago_Valvula	PLA (Blanco)	0,2	0,8	15	Tocando la cama caliente	0:09	0,45	1
3D-Cruceta	PLA (Blanco)	0,2	0,8	15	NO	0:15	0,84	3
3D-Piston	PLA (Blanco)	0,2	0,8	15	Cualquier sitio	0:21	1,77	5
3D-Valvula	PLA (Blanco)	0,2	0,8	15	Cualquier sitio	0:11	0,53	2
3D-Biela	PLA (Blanco)	0,2	0,8	15	Tocando la cama caliente	0:16	1,11	3
3D-Biela_Valvula	PLA (Blanco)	0,2	0,8	15	Tocando la cama caliente	0:21	1,39	4
3D-Sombreretes	PLA (Blanco)	0,2	0,8	15	NO	0:15	0,85	3
3D-Engranajes conicos y palanca mariposa	PLA (Blanco)	0,15	0,8	15	NO	0:19	0,58	2
3D-Cabeza_Regulador y Eslabon	PLA (Blanco)	0,2	0,8	15	NO	0:12	0,66	2
3D-Eslabon	PLA (Blanco)	0,2	0,8	15	NO	0:06	0,33	1
3D-Palanca regulador	PLA (Blanco)	0,2	0,8	15	Tocando la cama caliente	0:12	0,57	2
3D-Manga	PLA (Blanco)	0,2	0,8	10	Tocando la cama caliente	0:13	0,76	2
3D-Brazo contrapeso	PLA (Blanco)	0,2	0,8	15	Tocando la cama caliente	0:18	1,13	3
3D-Brazo contrapeso	PLA (Blanco)	0,2	0,8	15	Tocando la cama caliente	0:18	1,13	3
3D-Polea_Regulador_2	PLA (Blanco)	0,2	0,8	15	NO	0:12	0,96	3
3D-Manivela Accionamiento	PLA (Blanco)	0,2	0,8	15	NO	0:09	0,47	1
3D-Manivela	PLA (Blanco)	0,2	0,8	10	NO	0:30	2,42	7
3D-Polea_Regulador_1	PLA (Blanco)	0,2	0,8	10	NO	0:44	3,54	11
3D-Volante inercia	PLA (Blanco)	0,2	0,8	10	Tocando la cama caliente	1:49	7,74	23

3D-Excentrica	PLA (Blanco)	0,2	0,8	10	NO	0:10	0,71	2
3D-Casquillo rodamientos	PLA (Blanco)	0,2	0,8	10	NO	0:08	0,49	1
3D-Casquillo rodamientos	PLA (Blanco)	0,2	0,8	10	NO	0:08	0,49	1
3D-V-Valvula de regulacion	PLA (Verde)	0,2	0,8	10	Tocando la cama caliente	0:15	0,81	2
3D-V-Tapa_regulador	PLA (Verde)	0,2	0,8	10	NO	0:14	0,83	2
3D-V-Cilindro-Valvula	PLA (Verde)	0,2	0,8	10	Tocando la cama caliente	3:43	14,43	43
3D-V-Tapa_Valvula_Va stago	PLA (Verde)	0,2	0,8	10	Tocando la cama caliente	0:09	0,68	2
3D-V-Tapa_Valvula	PLA (Verde)	0,2	0,8	10	Tocando la cama caliente	0:07	0,60	2
3D-V-Tapa_Cilindro_Va stago	PLA (Verde)	0,2	0,8	10	Tocando la cama caliente	0:23	2,15	6
3D-V-Tapa_Cilindro	PLA (Verde)	0,2	0,8	10	Tocando la cama caliente	0:20	2,07	6
3D-V-Guia	PLA (Verde)	0,2	0,8	10	NO	0:24	1,61	5
3D-V-Guia	PLA (Verde)	0,2	0,8	10	NO	0:24	1,61	5
3D-V-Guia	PLA (Verde)	0,2	0,8	10	Tocando la cama caliente	0:24	1,61	5
3D-V-SoporteS rodamientoS	PLA (Verde)	0,2	0,8	10	NO	0:50	3,82	11
3D-V-SoporteS superior rodamientoS	PLA (Verde)	0,2	0,8	10	NO	0:28	1,77	5

Tabla 3: Datos de configuración de las piezas impresas.

Cuando ya están impresas las piezas se retira la estructura de soporte de las piezas con unos alicates de puntas y se eliminan hilos y pequeños bultos o acumulaciones de material con un cutter. También se lijan las superficies para mejorar el acabado y para que las piezas encajen bien en el momento de ensamblar el prototipo. Algunos agujeros quedan demasiado cerrados o ligeramente deformados, por lo que se repasan con un taladro o un dremel con la broca adecuada al diámetro deseado.



Figura 97: Herramientas utilizadas para la fabricación de la base y para el acabado de las piezas.



Figura 98: Dremel (arriba), brocas de \varnothing 2, 4.2 y 6.5 mm.

Para el eje de la máquina se ha utilizado una varilla de madera de 10mm de diámetro y se le han añadido unos casquillos impresos para encajar los rodamientos, y también se ha construido la excéntrica como una pieza aparte. Los ejes del mecanismo del regulador se hacen utilizando varilla de madera de 2 y 3 mm de diámetro y para unir la cabeza del vástago del pistón y la cruceta con sus bielas correspondientes se utiliza varilla de madera de diámetro 4 mm.

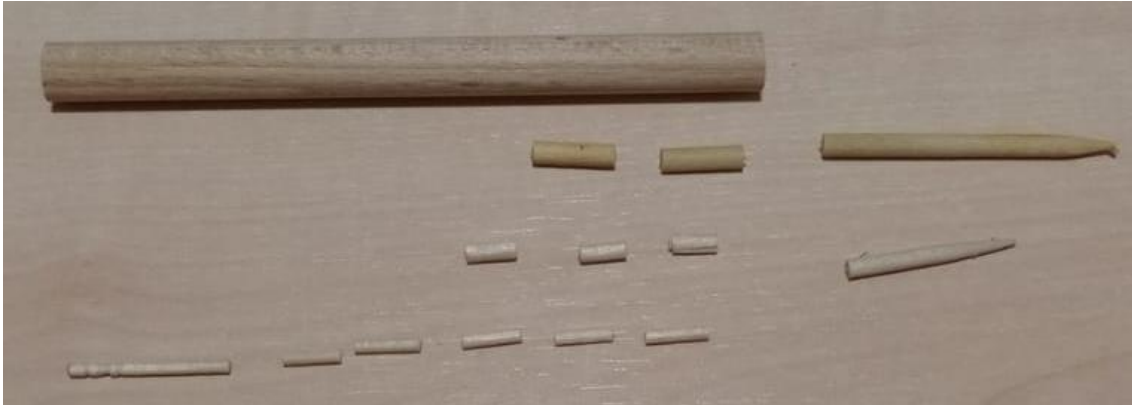


Figura 99: Piezas de madera de diferentes diámetros y cortadas.

Para transmitir el movimiento de las poleas se utiliza una goma elástica de caucho y para transmitir el movimiento de la palanca del regulador a la palanca que mueve la válvula de mariposa se utiliza un trozo de alambre de diámetro 1.5 mm al que se le ha dado la forma utilizando alicates y el tornillo de mesa.

Montaje



Figura 100: Barra hecha con alambre.

La válvula de mariposa, como es un elemento que no va a soportar cargas ni rozamientos, se fabrica con dos trozos de cartón pegados, formando un hueco para encajarlo en el eje.



Figura 101: Válvula de mariposa fabricada con cartón.

A modo de junta de estanquidad en el cilindro y en la válvula se utiliza un trozo de cordón que se pega a estos con cola.



Figura 102: Cordón utilizado para simular las juntas de estanquidad.

En los contrapesos del regulador se hacen unos agujeros que permiten el roscado de un pequeño tirafondo que pesa 2 gramos. En el montaje se probará con y sin tornillos, y se elegirá, dependiendo de lo bien que funcione el mecanismo de regulador, un modo u otro.



Figura 103: Tornillo y brazo-contrapeso (izquierda). Brazo-contrapeso con tornillo (derecha).

9 Montaje y uniones.

Para unir los listones a la base se utiliza cola de contacto y unos clavos pequeños.

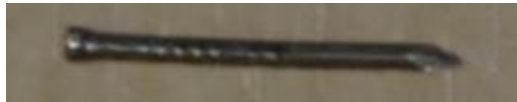


Figura 104: Clavo utilizado para unir los listones a la base.

Para la fabricación de los ejes del regulador y los vástagos de la válvula y el pistón se han utilizado tramos, cortados a la medida adecuada, de varilla roscada de métrica 5. La cabeza del vástago de la válvula y la cruceta del pistón se han modificado añadiendo una cavidad para encajar una tuerca de métrica 5. También se han roscado los agujeros con un juego de machos de roscar y un bandeador.



Figura 105: Tuerca y varilla roscada M5.

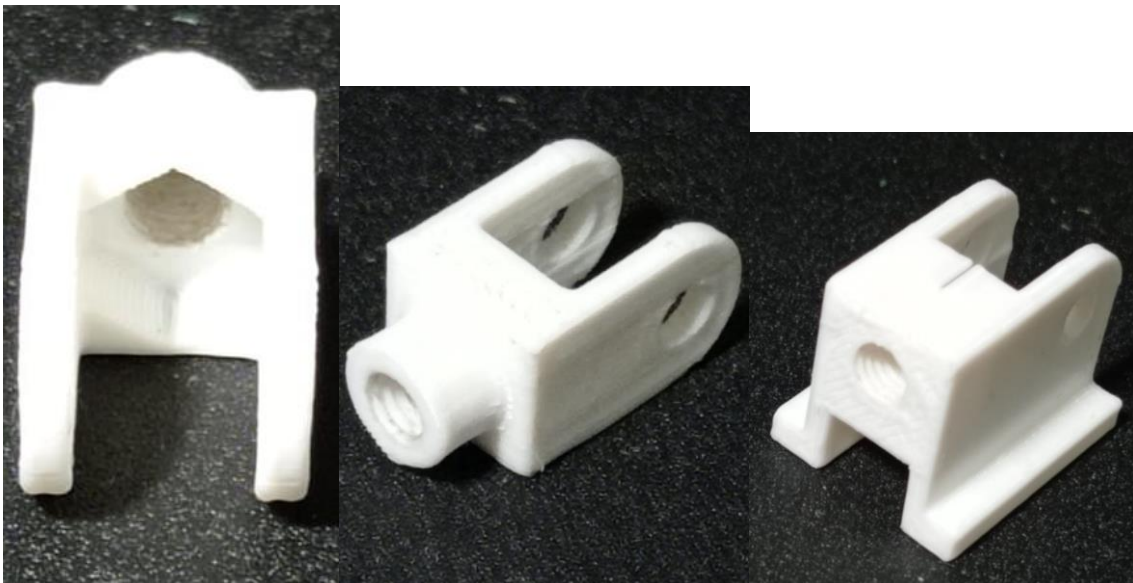


Figura 106: Cavidad hexagonal (izquierda) y agujeros roscados M5 (centro y derecha).

También se roscan otras piezas con uniones atornilladas de métrica 4.



Figura 107: Biela con dos agujeros roscados M4.



Figura 108: Juego de machos de roscar M5, M4 y bandeador.

Dependiendo de la pieza se han utilizado diferentes tipos de tornillos de métrica 4 de los que se disponía.



Figura 109: Diferentes tipos de tornillos y tuercas de M4 (izquierda). Destornillado de punta de cruz, plana, y llave allen utilizados para el montaje (derecha).

Ya acabadas todas las piezas del prototipo se ensamblan los subensamblajes y después se unen estos a la base y entre si.

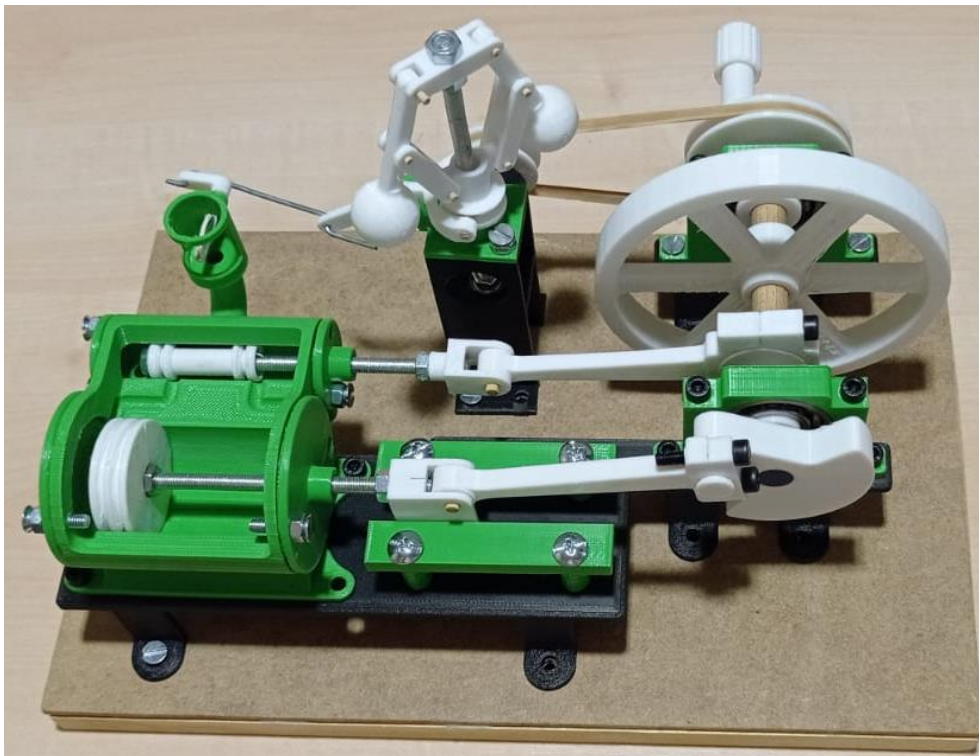


Figura 110: Vista frontal del prototipo ensamblado.



Figura 111: Vista trasera del prototipo ensamblado.

10 Presupuesto de fabricación del prototipo.

Se calcula un presupuesto aproximado del diseño y fabricación del prototipo.

	Coste unitario	Cantidad	TOTALES
Mano de obra	13 €/ h	200	2.600,00 €
Material PLA	0,017 €/ g	174	2,96 €
Consumo Electrico (potencia 270 W)	0,29 €/ kw h	14,55	1,14 €
Piezas impresas en la universidad	11,62 3,34 3,51	1	18,47 €
Varillas de M5	0,25 €	3	0,75 €
Tuercas M5	0,05 €	18	0,90 €
Tornillos de M4	0,07 €	47	3,29 €
Tuercas M4	0,05 €	28	1,40 €
Tabla de MDF	1,80 €	1	1,80 €
Varilla madera lisa Ø 10 mm	1,89 €	1	1,89 €
Liston madera 12x12 mm	2,39 €	1	2,39 €
Clavo 1x16 mm	0,01 €	20	0,20 €
Rodamiento 628/5-ZZ 5x11x4mm ISB	1,71 €	4	6,84 €
Rodamiento 6002 15x32x9mm ISB	1,16 €	2	2,32 €
Envio rodamientos	9,68 €	1	9,68 €
SUMA TOTALES			2.654,03 €
AÑADIDO IMPRESISTOS 10%			265,40 €
PRESUPUESTO TOTAL PROTOTIPO			2.919,43 €

Tabla 4: Presupuesto.

11 Conclusiones

La tecnología de las máquinas de vapor de pistón es hoy en día anticuada, pero no lo es el uso de turbinas de vapor para la generación de electricidad.

Las máquinas de vapor a pistón tienen la desventaja de tener un rendimiento muy bajo y el peligro que supone la caldera de combustión es alto, ya que se tiene fuego y vapor acumulado en un depósito a alta presión. La ventaja es que funciona con recursos fácilmente accesibles, agua y carbón, que puede ser sustituido por madera u otro material combustible. También son relativamente fáciles de fabricar.

Por las ventajas que tienen no considero las máquinas de vapor de pistón como tecnología totalmente descartable. En caso de catástrofe un generador eléctrico portátil que funcionase con una máquina de vapor de pistón podría ser útil. También podría ser útil para el transporte.

En cuanto a la fabricación de piezas utilizando la impresión 3D, cabe destacar la gran posibilidad que ofrece para fabricar piezas complejas de una forma rápida y barata. Es extremadamente útil para la fabricación de prototipos. Aunque no es recomendable roscar con macho piezas impresas en 3D, es posible hacerlo con piezas que no van a soportar cargas. No ha habido complicaciones a la hora del roscado de M5 pero en de M4 ha sido más difícil de mantener el tacto y algunos agujeros se han pasado de rosca en piezas de PLA. El roscado de los dos agujeros del soporte del regulador se ha hecho muy bien con el material Onyx.

Respecto a la elaboración del prototipo considero que a pesar de las simplificaciones realizadas se han alcanzado los objetivos y he aprendido, de forma básica, la fabricación de piezas por impresión en 3D.

Bibliografía

- [1] Felipe Augusto, “Visita a «La Casa Grande»(Torrejón de Velasco – Madrid).”, www.lamoltura.es, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.lamoltura.es/visita-a-la-casa-grandetorrejon-de-velasco-madrid/>. [Accedido: feb.-2022]
- [2] Rocío Ruz, “En imágenes, paseo de carruajes por el Parque de María Luisa”, sevilla.abc.es. [En línea]. Disponible en: https://sevilla.abc.es/sevilla/sevi-imagenes-paseo-carruajes-parque-402998942325-20210924175937_galeria.html#imagen30. [Accedido: feb.-2022]
- [3] Miguel G^a Puente, “Cómo funciona un molino de viento (para que los niños lo entiendan)”, planesconhijos.com, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://planesconhijos.com/ciencia-para-ninos/como-funciona-molino-viento/>. [Accedido: feb.-2022]
- [4] “Molino hidráulico”, es.wikipedia.org, 2021. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Molino_hidráulico. [Accedido: feb.-2022]
- [5] “Serrería de Hierápolis”, es.wikipedia.org, 2021. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Serrería_de_Hierápolis. [Accedido: feb.-2022]
- [6] “Real Taller Aserrío Mecánico (Valsaín)”, segoviaturismo.es. [En línea]. Disponible en: <https://segoviaturismo.es/ven-a-segovia/turismo-industrial/patrimonio-industrial/2835-el-real-aserrio-mecanico-y-su-maquina-de-vapor-valsain>. [Accedido: feb.-2022]
- [7] Lluís Bonada, “Un pasado industrial”, www.eltemps.cat, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.eltemps.cat/article/5751/un-passat-industrial>. [Accedido: feb.-2022]

- [8] Xabier Cabezón, “Locomotoras Engerth”, www.plazaola.net, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://www.plazaola.net/mmovil/engerth.html>. [Accedido: feb.-2022]
- [9] Vicent Selva Belén, “Revolución Industrial”, economipedia.com, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://economipedia.com/definiciones/primerarevolucion-industrial.html>. [Accedido: feb.-2022]
- [10] REAL ACADEMIA ESPAÑOLA: *Diccionario de la lengua española*, 23.ª ed., [versión 23.5 en línea]. Disponible en: <https://dle.rae.es/máquina>. [Accedido: feb.-2022]
- [11] “Eolípila”, es.wikipedia.org, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Eolípila>. [Accedido: feb.-2022]
- [12] Rafael Eugenio Romer, “Jerónimo de Ayanz, el gran olvidado en su cuarto centenario”, www.tecnicaindustrial.es, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.tecnicaindustrial.es/jeronimo-de-ayanz-el-gran-olvidado-en-su-cuar/>. [Accedido: feb.-2022]
- [13] “Thomas Savery”, en.wikipedia.org, 2022. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Savery. [Accedido: feb.-2022]
- [14] “Newcomen atmospheric engine”, en.wikipedia.org, 2022. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Newcomen_atmospheric_engine. [Accedido: feb.-2022]
- [15] “Watt steam engine”, en.wikipedia.org, 2022. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Watt_steam_engine. [Accedido: feb.-2022]
- [16] “Watt's linkage”, en.wikipedia.org, 2021. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Watt's_linkage. [Accedido: feb.-2022]

- [17] “Parallel motion”, en.wikipedia.org, 2021. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Parallel_motion. [Accedido: feb.-2022]
- [18] “Sun and planet gear”, en.wikipedia.org, 2022. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Sun_and_planet_gear. [Accedido: feb.-2022]
- [19] “Regulador centrífugo”, es.wikipedia.org, 2022. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Regulador_centrífugo. [Accedido: feb.-2022]
- [20] “D.C. POWER STATIONS - Steam Engines”, www.bathtram.org. [En línea]. Disponible en: <https://www.bathtram.org/tfb/tT113.htm>. [Accedido: feb.-2022]
- [21] “Category:Bottle engines”, commons.wikimedia.org, 2017. [En línea]. Disponible en: https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Bottle_engines. [Accedido: feb.-2022]
- [22] “Category:Table engines”, commons.wikimedia.org, 2019. [En línea]. Disponible en: https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Table_engines. [Accedido: feb.-2022]
- [23] “Category:Single-cylinder horizontal stationary steam engines”, commons.wikimedia.org, 2012. [En línea]. Disponible en: https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Single-cylinder_horizontal_stationary_steam_engines. [Accedido: feb.-2022]
- [24] “Oscillating cylinder steam engine”, en.wikipedia.org, 2021. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Oscillating_cylinder_steam_engine. [Accedido: feb.-2022]

- [25] “Category:Compound steam engines”, commons.wikimedia.org, 2020. [En línea]. Disponible en: https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Compound_steam_engines. [Accedido: feb.-2022]
- [26] “Slide valve”, en.wikipedia.org, 2021. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Slide_valve. [Accedido: feb.-2022]
- [27] “Corliss steam engine”, en.wikipedia.org, 2022. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Corliss_steam_engine. [Accedido: feb.-2022]
- [28] “Uniflow steam engine”, en.wikipedia.org, 2022. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Uniflow_steam_engine. [Accedido: feb.-2022]
- [29] “Stumpf Una-flow Engine”, sites.google.com/site/phase3project/. [En línea]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/phase3project/projects/steam-engine/engine-designs/stumpf-una-flow>. [Accedido: feb.-2022]
- [30] “Governor (device)”, en.wikipedia.org, 2022. [En línea]. Disponible en: [https://en.wikipedia.org/wiki/Governor_\(device\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Governor_(device)). [Accedido: feb.-2022]
- [31] mekanizmalar, “Shaft Governor Application”, www.youtube.com, 2012. [Vídeo en línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=sKxggPZzGpk>. [Accedido: feb.-2022]
- [32] Saif M, “Steam Engines: Parts, Types, Working Principle, and More”, www.theengineerspost.com, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.theengineerspost.com/steam-engines-types-parts/>. [Accedido: feb.-2022]

- [33] “Steam Engine Defination | Types and Principle Of Steam Engine”, www.mechanicaltutorial.com, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.mechanicaltutorial.com/steam-engine-defination-and-working-principle-of-steam-engine>. [Accedido: feb.-2022]
- [34] “Category:Willans steam engines”, commons.wikimedia.org, 2019. [En línea]. Disponible en: https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Willans_steam_engines. [Accedido: feb.-2022]
- [35] Jerry M Malloy, “Col. Francis G. Ward Pumping Station”, www.buffalohistorygazette.net, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://www.buffalohistorygazette.net/2010/09/holly-steam-engines-at-col-francis-g.html>. [Accedido: feb.-2022]
- [36] Derek Gee, “A Closer Look: Inside the Col. Ward Pumping Station”, buffalonews.com, 2022. [En línea]. Disponible en: https://buffalonews.com/multimedia/a-closer-look-inside-the-col-ward-pumping-station/collection_9f0b08c0-8e74-11ec-bf70-b337a3dac404.html. [Accedido: feb.-2022]
- [37] “La máquina de vapor”, <http://apuntes.santanderlasalle.es>. [En línea]. Disponible en: http://apuntes.santanderlasalle.es/historia_1/industrializacion/industrializacion.htm. [Accedido: feb.-2022]
- [38] “Grupo electrógeno Van der Kerchove”, institucionales.us.es. [En línea]. Disponible en: <http://institucionales.us.es/museoetsi/maquinas-y-motores/grupo-electrogeno-van-der-kerchove/>. [Accedido: feb.-2022]
- [39] “Semi-portable engine”, en.wikipedia.org, 2021. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Semi-portable_engine. [Accedido: feb.-2022]

- [40] “Burro de vapor”, es.wikipedia.org, 2021. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Semi-portable_engine. [Accedido: feb.-2022]
- [41] “Steam car”, en.wikipedia.org, 2022. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Steam_car. [Accedido: feb.-2022]
- [42] “Tractor de vapor”, es.wikipedia.org, 2019. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Tractor_de_vapor. [Accedido: feb.-2022]
- [43] Davidson, E. M, “First steam harvester, built by Stockton J. Berry”, calisphere.org, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://calisphere.org/item/ark:/13030/kt9f59q6w1/>. [Accedido: feb.-2022]
- [44] “Road roller”, en.wikipedia.org, 2022. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Road_roller. [Accedido: feb.-2022]
- [45] “Steam shovel”, en.wikipedia.org, 2022. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Steam_shovel. [Accedido: feb.-2022]
- [46] “Steam crane”, en.wikipedia.org, 2021. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Steam_crane. [Accedido: feb.-2022]
- [47] “Locomotora de vapor”, es.wikipedia.org, 2022. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Locomotora_de_vapor. [Accedido: feb.-2022]
- [48] “Titanic”, en.wikipedia.org, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://en.wikipedia.org/wiki/Titanic>. [Accedido: feb.-2022]
- [49] “Steam tank”, en.wikipedia.org, 2022. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Steam_tank. [Accedido: feb.-2022]
- [50] “Aircraft catapult”, en.wikipedia.org, 2022. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Aircraft_catapult. [Accedido: feb.-2022]

- [51] Alejandro Polanco Masa, “Volando a todo vapor”, alpoma.net/tecob/, 2008. [En línea]. Disponible en: <https://alpoma.net/tecob/?p=1039>. [Accedido: feb.-2022]
- [52] “MÁQUINAS TÉRMICAS CICLO DE CARNOT”, www.liceoagb.es, [En línea]. Disponible en: <https://www.liceoagb.es/quimigen/termo9.html>. [Accedido: mar.-2022]
- [53] “Fogón (locomotora de vapor)”, es.wikipedia.org, 2020. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Fogón_\(locomotora_de_vapor\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Fogón_(locomotora_de_vapor)). [Accedido: mar.-2022]
- [54] “Caldera de tubos de fuego”, es.wikipedia.org, 2021. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Caldera_de_tubos_de_fuego. [Accedido: mar.-2022]
- [55] “Piston valve (steam engine)”, en.wikipedia.org, 2021. [En línea]. Disponible en: [https://en.wikipedia.org/wiki/Piston_valve_\(steam_engine\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Piston_valve_(steam_engine)). [Accedido: mar.-2022]
- [56] “DIAGRAMA MOTOR CON VÁLVULA CILINDRICA.-”, <http://www.cfvn.es/>. [En línea]. Disponible en: <http://www.cfvn.es/vercategoria.php?id=55>. [Accedido: feb.-2022]
- [57] “Cruceta (motor)”, es.wikipedia.org, 2020. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Cruceta_\(motor\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Cruceta_(motor)). [Accedido: mar.-2022]
- [58] New York Public Library/Science Source, Corliss Centennial Engine, 1876”, www.sciencesource.com, [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencesource.com/archive/Image/Corliss-Centennial-Engine--1876-SS2529217.html>. [Accedido: mar.-2022]

- [59] “Fleming Harrisburg Engine”, sites.google.com/site/opensourcesteam/. [En línea]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/opensourcesteam/technology/engines/fleming-harrisburg-engine>. [Accedido: mar.-2022]
- [60] “Las bolas que giran en las máquinas de vapor”, www.aulafacil.com, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.aulafacil.com/articulos/ciencia-y-tecnologia/las-bolas-que-giran-en-las-maquinas-de-vapor-t1081>. [Accedido: mar.-2022]
- [61] “Category:Steam engines with piston valves”, commons.wikimedia.org, 2010. [En línea]. Disponible en: https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Steam_engines_with_piston_valves. [Accedido: abr.-2022]
- [62] Trupti J. Navathale, Prof. Anand A. Paralkar, Prof. Vijaykumar S. Ghorade, “DESIGN AND ANALYSIS OF CENTRIFUGAL GOVERNOR: A REVIEW”, Documento: IRJET-V4I1185.pdf, 2017. [Accedido: abr.-2022]