



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

ESTUDIO HISTÓRICO- TECNOLÓGICO, MODELADO Y RECONSTRUCCIÓN A ESCALA DE LA BOMBA DE SEIS CILINDROS DE TAQI AD-DÎN

Alumno: Ildefonso M. Cabeza Águila

Tutor: Prof. D. Gustavo Medina Sánchez

Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Área: Ingeniería de Procesos de Fabricación

Noviembre, 2020



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera
(Ingeniería de Procesos de Fabricación)

Don Gustavo Medina Sánchez, tutor del Trabajo Fin de Grado titulado: “Estudio histórico-tecnológico, modelado y reconstrucción a escala de la bomba de seis cilindros de Taqī ad-Dīn”, que presenta Ildefonso M. Cabeza Águila, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Noviembre de 2020

El alumno:

El tutor:

Ildefonso M. Cabeza Águila

Gustavo Medina Sánchez

Índice de contenido

1	FINALIDAD Y METODOLOGÍA DE TRABAJO	6
2	INTRODUCCIÓN.....	7
2.1	Ingeniería Medieval en la Península Ibérica	7
2.2	Comparación Ingeniería Árabe Occidental y Oriental	8
2.2.1	Ingenieros árabes más prolíficos de la Edad Media.....	9
3	LIBRO "EL SUBLIME MÉTODO DE LAS MÁQUINAS" DE TAQI AD-DÎN.....	12
4	BOMBA DE ELEVACIÓN DE AGUA DE SEIS CILINDROS	15
4.1	Funcionamiento de la Bomba de Seis Cilindros.....	16
5	DISEÑO Y MODELADO DIGITAL	18
5.1	Antecedentes de partida.....	18
5.2	Software y Hardware.....	19
5.3	Modelado Geométrico Bomba de Seis Cilindros.....	22
5.3.1	Eje de levas	22
5.3.2	Rueda de cucharas	24
5.3.3	Sistema de tuberías	25
5.3.4	Cilindros y Pistones.....	27
5.3.5	Sistema de barras	30
5.4	Ensamblaje sistema de bombeo	32
6	CÁLCULOS	32
6.1	Análisis Cinemático	33
6.2	Cálculo del peso de las plomadas	36
6.3	Estudio de movimiento	46
7	FABRICACIÓN DE PIEZAS CON MPRESIÓN 3D.....	52
7.1	Introducción fabricación aditiva	52
7.2	Software y hardware	53
7.3	Proceso de impresión	57
8	MONTAJE	64
9	CONCLUSIONES.....	66
10	BIBLIOGRAFÍA.....	67
11	ANEXOS.....	70

11.1 Planos.....	70
------------------	----

Índice de figuras

Figura 1: Clepsidra de las gacelas, Al Murādī (Exposición Leonardo3 – Milán, Italia) ...	9
Figura 2: Los tres hermanos Muhammad, Ahmad y Al Hasan, hijos de Mûsa ibn Shâkir (Álvarez, 2016):	10
Figura 3: Cigüeñal Al-Jazarī (Palazzesi, 2007):	11
Figura 4: Ejemplo invención de relojes de Taqī ad-Dīn	13
Figura 5: Ejemplo dispositivo levantamiento de pesas Taqī ad-Dīn	13
Figura 6: Bomba en espiral de Taqī ad-Dīn	14
Figura 7: Primeras tres páginas descripción bomba de seis cilindros en Chester Beatty MS de Al-Turuq al-Saniya.	16
Figura 8: Propuesta virtual de la bomba de seis cilindros	17
Figura 9: Movimiento ascendente pistón.....	17
Figura 10: Movimiento descendente pistón.....	18
Figura 11: Ejemplo software CAD.....	20
Figura 12: Ejemplo software CAM.....	20
Figura 13: Ejemplo software CAE	20
Figura 14: Entorno Autodesk Inventor 2018.....	21
Figura 15: Forma establecida eje de levas.....	23
Figura 16: Colocación de levas a lo largo del eje	23
Figura 17: Cogida eje para rueda de paletas	24
Figura 18: Conjunto paleta - eje de rueda.....	24
Figura 19: Rueda de paletas.....	25
Figura 20: Sección sistema de tuberías	25
Figura 21: Válvula Clac.....	26
Figura 22: Croquis entrada red de tuberías.....	27
Figura 23: Colocación válvula clac en entrada red de tuberías	27
Figura 24: Cilindro con acoplamiento.....	28
Figura 25: Colocación válvula Clac en base cilindro	28
Figura 26: Junta pistón	29
Figura 27: Visión de corte junta de pistón	30

Figura 28: Estructura pivotante de los balancines.....	31
Figura 29: Cogida de balancín - pistón	31
Figura 30: Ensamblaje de pistones y balancines	32
Figura 31: Croquis esquema cinemático simbólico	33
Figura 32: Medidas del esquema cinemático simbólico	34
Figura 33: Carrera del pistón en el cilindro.....	35
Figura 34: Determinación de ángulos para la carrera asignada	36
Figura 35: Ejemplo volumen columna de agua tubería central.....	37
Figura 36: Variación de sección cilindro - tubería.....	39
Figura 37: Volumen pistón	42
Figura 38: Cálculo longitud libre de pandeo (www.ingemecanica.com).....	43
Figura 39: Mapa de tensiones, Von Mises, para cilindro	45
Figura 40: Esquema cinemático simbólico con propiedades de materiales.....	47
Figura 41: Mapa de tensiones, Von Mises, cogida balancín - pistón	48
Figura 42: Mapa de tensiones, von Mises, de leva	48
Figura 43: Posicionamiento de ejes en pistón	49
Figura 44: Gráfica velocidad lineal del pistón.....	49
Figura 45: Gráfica comparativa de aceleración tangencial y normal	50
Figura 46: Gráfica resultante de la aceleración en el pistón	50
Figura 47: Gráfica reparto de presión dentro del cilindro (subida pistón).....	52
Figura 48: Etapas prototipado rápido (Gibson, 2010).....	53
Figura 49: Impresora 3D utilizada para el presente TFG.....	54
Figura 50: Ejemplo de extrusor (www.eltucan.es)	55
Figura 51: Filamento usado en la impresión	56
Figura 52: Entorno CURA 3.6	57
Figura 53: Ajuste de dimensiones de piezas.....	58
Figura 54: Parámetros de calidad elegidos	59
Figura 55: Parámetros de perímetro elegidos	60
Figura 56: Parámetros de relleno elegidos.....	60
Figura 57: Parámetros de material elegidos.....	61
Figura 58: Parámetros de velocidad elegidos	61
Figura 59: Parámetros de soporte elegidos	62

Figura 60: Fallos de impresión encontrados	63
Figura 61: Ejemplo unión macho hembra.....	64
Figura 62: Unión red de tuberías	65
Figura 63: Ensamblaje de la bomba de seis cilindros de Taqī ad-Dīn	65

Índice de tablas

Tabla 1: Volumen y masa de columna de agua sistema de tuberías.....	37
Tabla 2: Constantes de pérdidas de presión en tuberías	40
Tabla 3: Pérdidas de carga en sistema de tuberías	41
Tabla 4: Propiedades hierro forjado (SolidWorks).....	44
Tabla 5: Propiedades roble (SolidWorks).....	47

1 FINALIDAD Y METODOLOGÍA DE TRABAJO

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado (en adelante, TFG) es la recreación 3D a escala reducida, pero fielmente reproducida, de la “*Bomba de Elevación de Agua de Seis Cilindros*” del ingeniero Taqī ad-Dīn, recogida en su libro *Al-Turuq al-Saniya fi al-Alat al-Ruhaniya* (Los Métodos Sublimes para Máquinas Espirituales) en el año 1551.

Para este propósito se desarrollarán las siguientes tareas:

- 1.** Recopilación de información acerca del mecanismo, tanto mecánica como los materiales que la componen.
- 2.** Reconstrucción virtual del conjunto, así como su movimiento cinemático.
- 3.** Análisis mecánico integrando la información recabada.
- 4.** Reproducción, a escala reducida del mecanismo, con la ayuda de una impresora 3D

2 INTRODUCCIÓN

La Edad Media (s. V al s. XV), fue un periodo histórico diverso y convulso para la civilización occidental. Quizás el imaginario colectivo ha calificado esta etapa histórica como una de las más oscuras, en lo que al progreso tecnológico, cultural y social se refieren. Sin embargo, consideramos esta calificación errónea, debido a que se lograron grandes avances, por ejemplo, en la ingeniería mecánica árabe, encontrando el precedente del mecanismo biela-manivela (Sierra, 2011), siendo la principal fuente de energía el salto o movimiento de grandes masas de agua. Estos avances sirvieron de base e influencia para generaciones posteriores.

En este sentido, la ingeniería mecánica árabe tiene un fuerte impulso y desarrollo de la mano del Islam Oriental, constituyendo una época dorada con Bagdad y al-Ándalus como epicentros.

2.1 Ingeniería Medieval en la Península Ibérica

Tras el derrumbe del Imperio Romano y la caída de la monarquía goda, la Península Ibérica en el año 711 d.C., queda dividida en dos civilizaciones; la islámica y la cristiana. En ambas zonas el agua y su suministro, tema que nos ocupa, fueron cruciales. En el área árabe se dio en torno al regadío, a través de sus maquinarias y sistemas respectivos, mientras que en la cristiana fue alrededor de los gremios y oficios manuales (Roldán, 2016). Estos desarrollos tecnológicos tanto cristianos como árabes se vieron influenciados por las culturas predecesoras a estos, romanos y árabes orientales respectivamente.

En lo relativo al abastecimiento de agua urbano, según González (2008) “las ciudades musulmanas tuvieron una dotación más generosa de agua” que las cristianas. Esta superioridad se repite, incluso de forma más clara, en los campos de regadío. Así, mientras que los cristianos poseen una dieta basada en la Triada mediterránea; cereal, viña y olivo de secano, los árabes, gracias a sus avanzadas técnicas de regadío, consiguieron cultivar verduras y hortalizas, moreras, arroz, caña de azúcar entre otros ya mencionados. A propósito de este desfase científico-técnico, durante la Reconquista, los Reyes Católicos

decretaron no destruir los sistemas de regadío árabe, para aprovechar el patrimonio tecnológico árabe peninsular de gran calidad y complejo, con tal de “evitar la necesidad de inventar estructuras complejas” (Sierra, 2011).

Determinados logros de la ingeniería de la época no son del todo conocidos debido a que los conocimientos han sido transmitidos de maestros a pupilos sin quedar constancia escrita. (Bautista, 2007)

2.2 Comparación Ingeniería Árabe Occidental y Oriental

La comunidad musulmana gracias a su posición estratégica en el Oriente Medio pudo aprovechar influencias técnicas, en lo relativo a la mecánica, de griegos, romanos, persas y chinos. Todo ello lo conocemos hoy día por la conservación de numerosas copias traducidas de manuscritos, códices, papiros e incluso tablillas, en las que plasmaban sus ideas. Esta influencia científico-técnica les sirvió de base para el desarrollo e invención de nuevas técnicas a los científicos árabes (El-Sergany, 2012).

Paralelamente el paso histórico de una economía esclavista a una menos dependiente de los esclavos como mano de obra y fuerza motriz económica, provocó, de forma irremediable, la agudización del ingenio para sustituirla por otra forma de mantener la actividad económico-productiva, las máquinas.

En nuestro acercamiento a la ingeniería medieval árabe, vemos que no es un único todo, sino que se subdivide en dos vertientes (Samsó, 1992, citado en Sierra, 2011):

- **La occidental:** Ubicada en la Península Ibérica y el Norte de África, caracterizada por fabricar y emplear grandes máquinas de poderosa fuerza motriz y rudeza en sus mecanismos. Asimismo, hay que señalar de esta corriente su aprovechamiento de la tecnología romana previa a su llegada a la Península Ibérica, lo que sin duda, constituyó una base de considerable importancia para su posterior desarrollo científico-técnico.

La técnica y las máquinas obtienen importancia sólo en comunidades muy reducidas, de tal forma que la conciencia técnica y divulgación quedan dentro de estos colectivos, (Bautista, 2007).

- **La oriental:** Sus principales representantes son BadīʿAz-Zamān Al-Jazarī y los Banu (los hijos de) Mūsa ibn Shākir. Además, predominó el uso de mecanismos delicados con controles sutiles de naturaleza hidráulica y neumática.

2.2.1 Ingenieros árabes más prolíficos de la Edad Media.

Continuando con la distinción entre oriente y el occidente, podemos nombrar a Alī Ibn Khalaf al-Murādī (siglo XI d.C.), asentado en el sur de Al-Ándalus, como el hombre que más relevancia tuvo en la ingeniería árabe de occidente, con su libro “El Libro de los Secretos Resultantes de las Ideas” (كتاب أسرار الأفكار الناتجة , kitab al-asrar al'afkar alnnatija) (figura 1); en el documento viene recogido el testimonio de los primeros mecanismos complejos de la época, usualmente usando poleas, contrapesos, cuerdas y depósitos de agua. El resultado de la combinación de estos elementos hizo que la corriente creativa se expandiera por el norte de África y Europa. (Viguera, 1994).

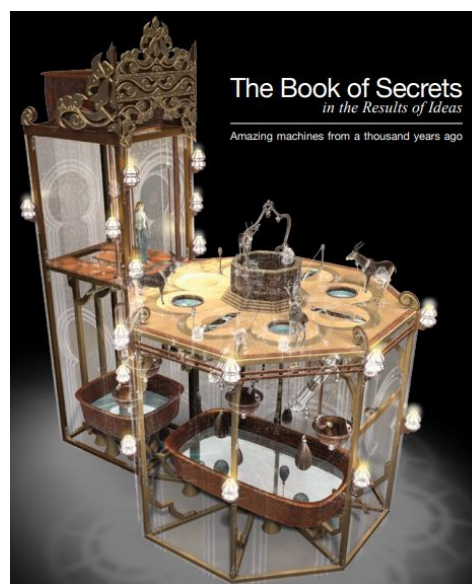


Figura 1: Clepsidra de las gacelas, Al Murādī (Exposición Leonardo3 – Milán, Italia)

La civilización árabe, históricamente, ha impulsado la evolución de las ciencias mecánicas de Oriente de la mano de numerosos eruditos, genios, inventores, científicos expertos en o de diversas índoles y materias. En primer lugar mencionaremos a los tres hermanos Muhammad, Ahmad y Al Hasan, hijos de Mûsa ibn Shâkir (siglo IX d.C.) (figura 2), quienes elaboraron el *Hial Bani Mûsa*, manuscrito trascendental en el desarrollo tecnológico de la ingeniería mecánica árabe, (Bautista, 2007). La obra consta de cien estructuras mecánicas, de entre las que podemos destacar el uso de las válvulas cónicas y los cigüeñales automáticos, elementos que se describen sin precedentes, en palabras del Dr. Ragheb El-Sergany “uno de los logros más importante en la historia de la ciencia y de la técnica en general”.



Figura 2: Los tres hermanos Muhammad, Ahmad y Al Hasan, hijos de Mûsa ibn Shâkir (Álvarez, 2016):

En el campo del diseño de relojes y dispositivos con ruedas dentadas que transforman el movimiento lineal en circular, el precedente de los motores contemporáneos, tiene mucha relevancia Badî ‘Az-Zamân Al-Jazarî (siglo XII d.C.). Este sabio fue autor del libro *Al Yâmi‘Bain Al ‘Ilm Ua Al ‘Amal An-Nâfi‘Fi Sinâ‘at Al Hial*. En él, Al-Jazarî describe unos cien mecanismos, de los que podemos destacar la sutileza del diseño de sus clepsidras, relojes de agua. Además de los mencionados, la invención de dispositivos de elevación de agua despegó con las aportaciones de este (figura 3). Los inventos de Al-Jazarî tuvieron aportaciones que se vieron en el diseño posterior de máquinas de vapor y motores de combustión interna (Hill, 1998).

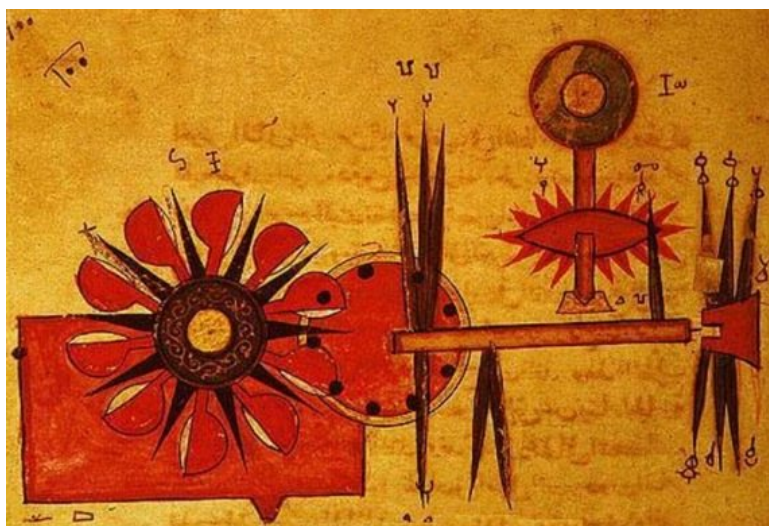


Figura 3: Cigüeñal Al-Jazarī (Palazzesi, 2007):

Tras los descubrimientos anteriores el imperio otomano declaró la centralización del poder en el siglo XVI d.C. lo que provocó un rápido desarrollo en las actividades científicas. Es en esta época en la que Taqī ad-Dīn Ad-Dimashq (siglo XVI d.C.), figura central del presente TFG, desarrolla su obra y revolucionó varios dispositivos de su predecesor, Al-Jazarī. Así, una de estas máquinas revolucionarias fue la *“Bomba de Elevación de Agua de Seis Cilindros”*, la que reproduciremos tridimensionalmente (3D) en apartados posteriores. Si hablamos de Taqī ad-Dīn hemos de mencionar al Dr. al-Hassan, quien gracias a su labor de recopilación y posterior divulgación científica de varios de sus libros ha expuesto el conocimiento del inventor al mundo. En estos se describen varias máquinas vistas en sus predecesores y otras inéditas. La obra principal de Taqī ad-Dīn es *Al-Turuq al-samiyya fi al-alat al-ruhaniyya* (“El Sublime Método de las Máquinas”, año 1551). La importancia del tratado radica en que “completa un eslabón perdido en la historia de la tecnología árabe y, en particular, en la historia de la ingeniería mecánica árabe, así como describe varias máquinas nuevas que no se mencionaron en los libros anteriores” (Hassani, 1979).

3 LIBRO "EL SUBLIME MÉTODO DE LAS MÁQUINAS" DE TAQI AD-DÎN

Esta obra fue escrita en Damasco por Taqī ad-Dīn alrededor de 1551. Una copia manuscrita se encuentra en la Biblioteca Chester Beatty de Dublín fechada entre 1551 y 1552. En ella explica seis mecanismos los cuales nombraremos y describiremos, los más interesantes, a continuación. Este libro tiene un enfoque y estilo simple, inteligible y preciso. También destaca el valor de los esquemas de sus inventos, muy cercanos al estilo de representación de la ingeniería reciente, uniendo el concepto de proyección en la llamada perspectiva tridimensional, ayudando así al completo entendimiento de sus inventos. Este libro fue destruido en un 35% debido a la humedad y la mala conservación. Sin embargo, el Dr. Ahmad Y. Hassan, de la Universidad de Alepo, consigue reproducirlo y presentarlo en el I Congreso Mundial de Historia de las Ciencias entre los árabes (1976). Aunque el texto editado no ha sido provisto de notas explicativas para el lector poco cualificado en la materia. En este documento editado vienen más invenciones de Taqī ad-Dīn, pero nos centraremos a lo referido al libro *"El Sublime Método de las Máquinas"*, el cual se centra en la estructura geométrico-mecánica de las máquinas, utilizando el método de análisis usado con anterioridad por Banū Mūsā y Al-Jazarī. Los mecanismos de dicho libro son los siguientes:

1. Serie de Clepsidras, "La Caja de la Luna":

Se trata de un reloj astronómico conocido en la tecnología mecánica árabe, como señaló el propio Taqī ad-Dīn, *Las Estrellas Luminosas en Relojes Mecánicos*, en su otro libro de mecánica *Al-Kawākeb al-durriya fī 'l-bankāmāt al-dawriya*. (Al-Hassan, 1976). Además de una serie de cuatro tipos de relojes, incluidos relojes de agua y relojes de arena. Un ejemplo podemos verlo en la figura 4 (Hassaan, 2014)



Figura 4: Ejemplo invención de relojes de Taqī ad-Dīn

2. Dispositivos para el levantamiento de pesas:

Caracterizados por incluir una serie de engranajes (grúa), como podemos ver en la figura 5 (Hassaan, 2014), el movimiento se transmitía por cuerdas y carretes, y otra trabajada por un tornillo sinfín.

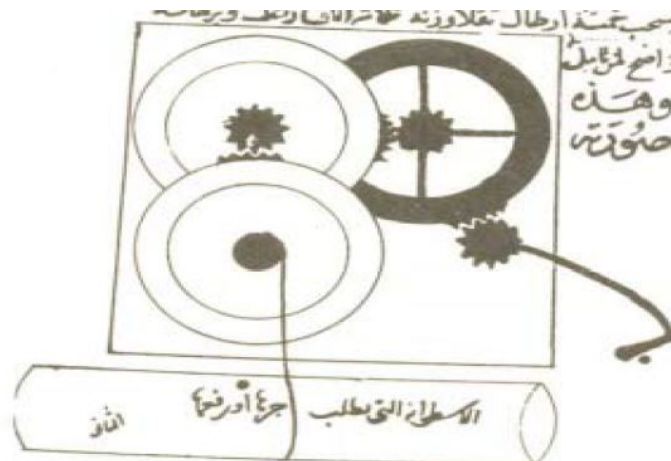


Figura 5: Ejemplo dispositivo levantamiento de pesas Taqī ad-Dīn

3. Dispositivos para elevar el agua:

Se describen varios tipos de máquinas de levantamiento de agua a las que se dedica una sección completa.

- La bomba con dos cilindros opuestos.
- La bomba en espiral, figura 6 (Hassan, 2014).
- La bomba de la cuerda con bolas de tela.

- La bomba de seis cilindros (el objetivo del presente TFG).

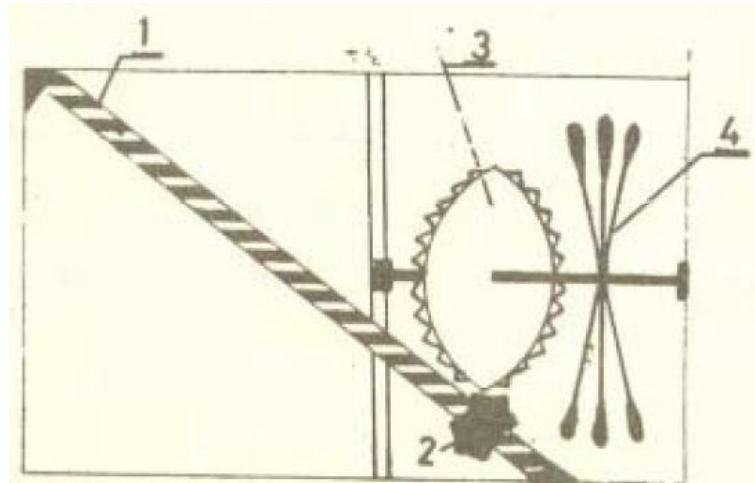


Figura 6: Bomba en espiral de Taqī ad-Dīn

4. Fuentes por el movimiento del agua:

Se consigue el sonido de flautas y timbales a través de diversos mecanismos sutiles, a los que podemos llamar de entretenimiento. Incluye la descripción de once trucos como el portador de agua, las dos copas de la justicia y la injusticia, el barco de marinero y otros. También se describieron herramientas similares en los libros de Banū Mūsā y Al-Jazarī.

5. Máquina giratoria automática con vapor:

Un trozo de carne es puesto sobre el fuego, que aunque pueda parecer rudimentaria, pone de manifiesto la primera turbina de vapor en 1551, anterior al descubrimiento más famoso del poder del vapor por Giovanni Branca en 1629. Los dispositivos descritos por los dos inventores hoy se conocen como tomas de vapor.

A este respecto, Taqī ad-Dīn escribió: "Parte seis: Hacer un asador que lleva carne sobre el fuego para que gire por sí mismo sin el poder de un animal. Esto fue hecho por personas de varias maneras, y una de ellas es tener al final del asador una rueda con paletas, y frente a la rueda coloque una jarra hueca de cobre con la cabeza cerrada y llena de agua. Deje que la boquilla de la jarra

esté enfrente de las paletas de la rueda. Kindle enciende debajo de la jarra y el vapor saldrá de su boquilla de forma restringida y girará la rueda de la paleta. Cuando la jarra se quede sin agua, acerque el agua fría a un recipiente y deje que la boquilla de la jarra se sumerja en el agua fría. El calor hará que toda el agua en la cuenca sea atraída hacia la jarra y el (vapor) comenzará a girar la rueda de paletas nuevamente." (Ihsanoglu, 2006).

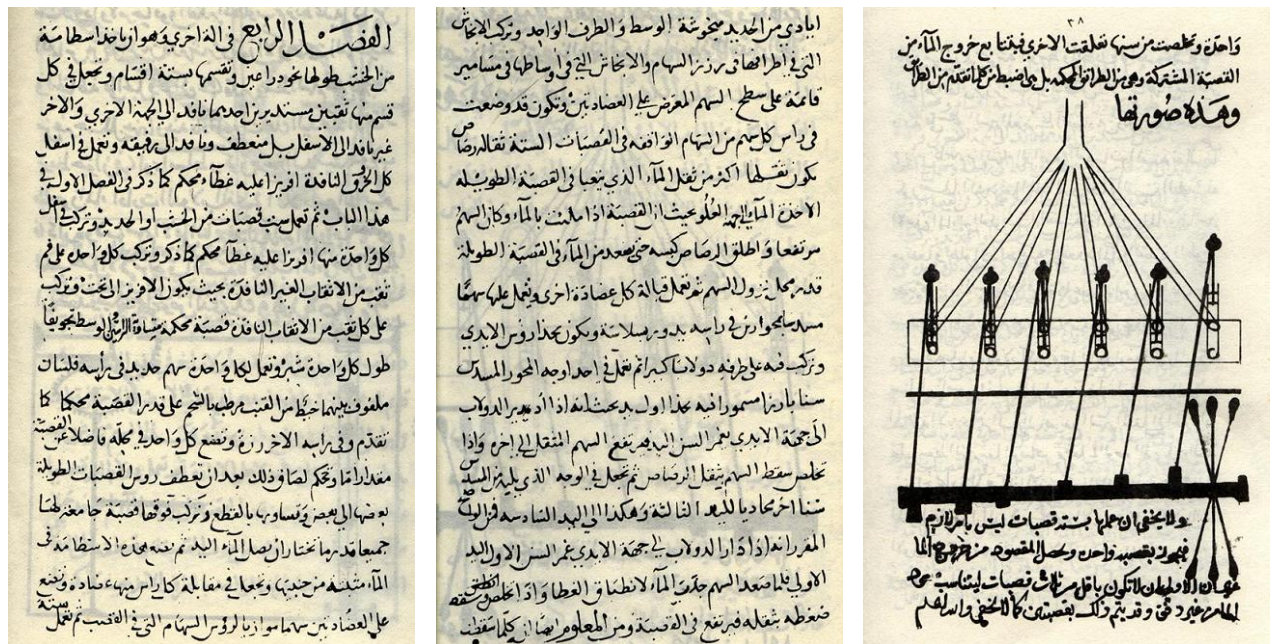
4 BOMBA DE ELEVACIÓN DE AGUA DE SEIS CILINDROS

Este mecanismo puede considerarse la bomba de agua más importante de Taqī ad-Dīn, como ya hemos citado anteriormente, viene recogida en su libro *"El Sublime Método de las Máquinas"*, de la cual el propio inventor siente un orgullo especial al describirla de la siguiente manera: "Este es un método inmaculado. Es el más perfecto de cualquiera de los anteriores". Nos podemos dar cuenta de la importancia del invento por el nivel de otros ingenieros como Agricola, su obra más relevante: *"De Re Metallica"* en 1556 y Ramelli: *"Le et diverso Artificiose Máquina"* en 1588, que describieron varios tipos de bombas pero ninguna similar a la de Taqī ad-Dīn.

Dicha bomba posee las siguientes características de diseño:

- Uso de un bloque de seis cilindros en línea, nunca usado hasta la fecha.
- Uso de un árbol de levas distribuidas cada uno a 60° del otro, y a lo largo de un eje, con la intención de crear un movimiento continuo.
- Uso del pistón accionado por gravedad, colocando una plomada en la parte superior de cada vástago.

Las evidencias bibliográficas de este invento en el manuscrito *Al-Turuq al-Saniya fī al-ālat al-rūhaniya*, las podemos encontrar en la Biblioteca Chester Beatty de Dublín, como se ha mencionado anteriormente, que dispone de las tres primeras páginas donde se describe (véase en las figura 7 (a), (b) y (c)) (Al-Hassani, 2009)



a) Página 36

b) Página 37

c) Página 38

Figura 7: Primeras tres páginas descripción bomba de seis cilindros en Chester Beatty MS de Al-Turuq al-Saniya.

4.1 Funcionamiento de la Bomba de Seis Cilindros

En primer lugar concretaremos la fuente energía y los materiales que harán funcionar y armar esta bomba. En el caso de los materiales, la madera será el componente mayoritario. No hay vestigios de que esta máquina llegara a construirse, pero en caso de que así lo fuera y contando con ubicación geográfica del ingeniero, Damasco, nos hace pensar que el material utilizado podría ser madera de roble o pino. Ya que aunque Siria pueda considerarse, a priori, una ubicación con zonas áridas y semi-áridas se distingue por un importante gradiente de diversidad fitogeográfica, (Daiyoub, 2018).

En el caso de su fuente de energía esta sería la del agua en movimiento de un río, el cual sirve a la vez de fuente de suministro de nuestra bomba. El río ejercerá una fuerza de arrastre en las paletas de la rueda, solidaria a un eje, en este están instaladas una serie de levas a 60° cada una respecto a la siguiente y anterior. Éstas, se dispondrán a lo largo del eje, siendo tantas como cilindros, seis. En la figura 8 vemos una imagen de la máquina.

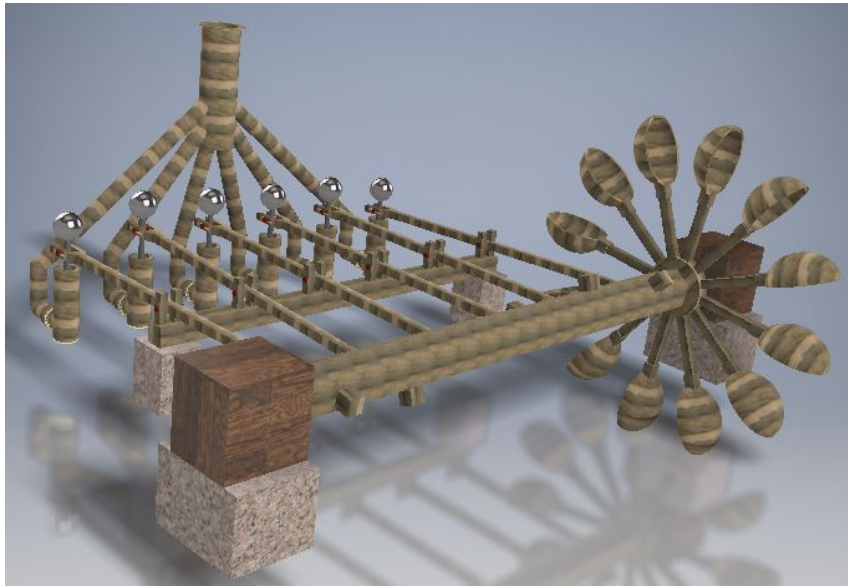


Figura 8: Propuesta virtual de la bomba de seis cilindros

En el giro del eje, la correspondiente leva empuja hacia abajo el extremo de un balancín, que pivota en unos pernos alojados en una estructura sujeta por dos fuertes pilares. En este movimiento de apoyo se producen fuerzas de fricción contrarias a las de arrastre, con lo que la fuerza total será la diferencia de estas dos. Este movimiento ascendente del balancín hace que se eleve el pistón, este cuenta con un peso de plomo en su extremo superior. En este movimiento ascendente se crea un vacío dentro del cilindro y empieza a llenarse de agua, pasando por una válvula clac (nº 1) (parte inferior del cilindro) (figura 9), que en ese caso de succión, se abre. Otra válvula clac (nº 2) (lateral inferior cilindro) colocada en la tubería que une el tubo de suministro y el cilindro, se cierra con motivo de la aspiración del pistón a lo largo del cilindro.

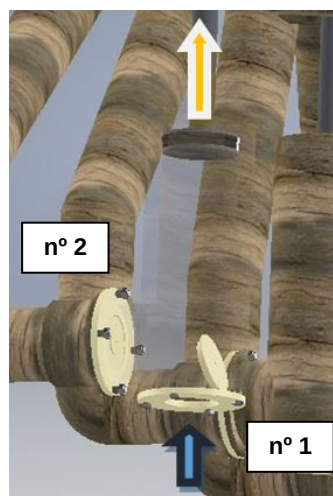


Figura 9: Movimiento ascendente pistón

A medida que el árbol de levas ejerce toda su fuerza sobre los balancines, simple contacto, el balancín es liberado. En este momento la barra de madera ya no dispone de una fuerza que la haga seguir bajando, es el momento que determina la carrera del pistón dentro del cilindro, ya que el movimiento del pistón depende del balancín. Posteriormente el pistón, por la gravedad de él mismo y la del peso cortante del plomo, el agua es empujada por el pistón con una dirección descendente y hace que la válvula clac nº 1 se cierre haciendo que el agua busque otra salida por el efecto de la presión del pistón. De este modo, el fluido encuentra que la válvula clac nº 2 se abre y proporciona suministro, figura 10, a las tuberías que en el final de su recorrido se unirán en una sola, la tubería central.

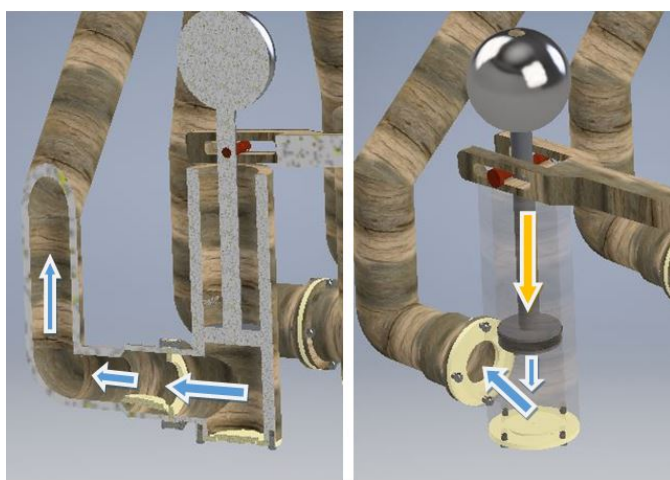


Figura 10: Movimiento descendente pistón

5 DISEÑO Y MODELADO DIGITAL

Siguiendo con la exposición de la bomba de seis cilindros, trataremos el diseño virtual del artefacto. El primer apartado hará referencia al software y hardware que se ha utilizado para dicho trabajo. A continuación daremos una detallada descripción del modelado de las diferentes piezas que constituyen la *“Bomba de Elevación de Agua de Seis Cilindros”* de Taqī ad-Dīn.

5.1 Antecedentes de partida

Las medidas que se han utilizado para este trabajo virtual han sido calculadas desde los dos únicos datos que Taqī ad-Dīn dejó en su libro *“El*

Sublime Método de las Máquinas”, la longitud del bloque de cilindros y la altura de los cilindros del pistón, refiriéndose a estos dos últimos componentes cita literalmente en su obra: *“Tome un bloque de madera de dos brazos de largo y divídalo en seis divisiones idénticas.”* (Al-Hassani, 2009).

Podemos interpretar que la medida de dos brazos, quiere referirse a una braza, que según el Centro Español de Metrología, una braza se define como *“la altura del cuerpo humano, pero se forma al poner los brazos en cruz con las puntas de los dedos estiradas”* (Prieto, 2008). De manera que el estándar de esta unidad de medida es un metro con sesenta y seis centímetros. No obstante, caben matices al respecto según la región, en algunas de ellas podía ser de un metro con cuarenta centímetros. En definitiva, se ha decidido promediar fijando la medida de la braza metro y medio.

Debido a las anteriores premisas se ha tenido que recurrir a la suposición de varias medidas para obtener un buen rendimiento mecánico al conjunto de estudio. Tampoco podemos acudir a los bocetos aportados por el autor en el mencionado libro. Si bien ofrecen una buena perspectiva pero no se encuentran acotados, por tanto resulta más apropiado consultar las aproximaciones que los ingenieros hicieron en las traducciones del manuscrito y de la bomba en concreto.

El estudio referencia que hemos escogido para el cálculo e interpretación de la máquina (Al-Hassani, 2009), contiene; bocetos virtuales, cálculos, además de videos animados del funcionamiento del conjunto. De estos últimos se han obtenido las interpretaciones apropiadas para proyectar un estudio representativo y claro de la máquina.

5.2 Software y Hardware

Si hablamos de herramientas de diseño en ingeniería podemos hacer referencia a los más empleados hoy en día en el sector, tales como:

Software CAD (Computer Aided Desing o Diseño Asistido por Ordenador): este sistema permite crear, modificar, analizar y optimizar planos en dos y tres dimensiones (Bonilla, 2003). Un ejemplo de ello es la figura 11.

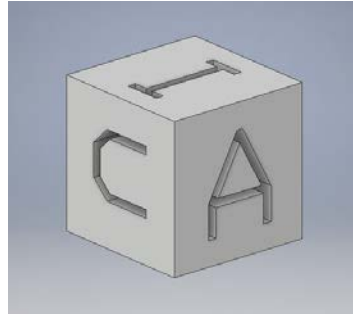


Figura 11: Ejemplo software CAD

Software CAM (Computer Aided Manufacturing o Fabricación Asistida por Ordenador): son sistemas informáticos con la ayuda del control numérico son capaces de fabricar piezas, con la ayuda de herramientas (Bonilla, 2003). En la figura 12 podemos ver un ejemplo de la simulación de una fresa.

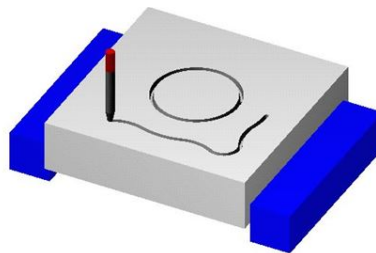


Figura 12: Ejemplo software CAM

Software CAE (Computer Aided Engineering o Ingeniería Asistida por Ordenador): estos sistemas verifican los elementos diseñados mediante CAD, para observar si así cumplen las expectativas deseadas (Bonilla, 2003), en la figura 13 podemos ver un ejemplo de una simulación de tensiones sobre una probeta en ensayo elasto-plástico.

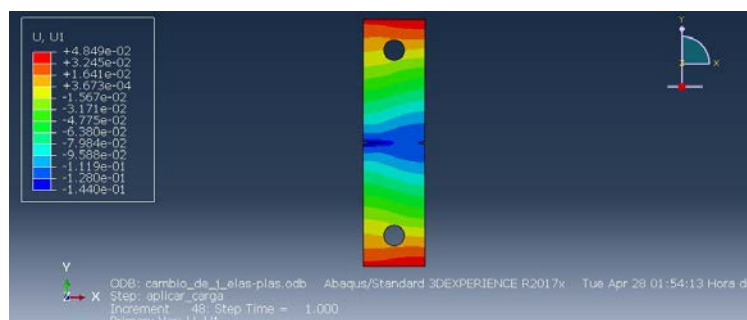


Figura 13: Ejemplo software CAE

Para la realización de este proyecto se ha recurrido al software CAD, *Inventor Professional 2018*, un producto diseñado por *Autodesk*, dentro de su gama *Product Design Collection*. Este software es considerado un abanderado del desarrollo de prototipos digitales, tiene la capacidad de trabajar con T-Splines, una herramienta que nos permite trabajar en superficies complejas con más facilidad. En la figura 14 podemos observar el entorno en el que se trabaja en el software Inventor.

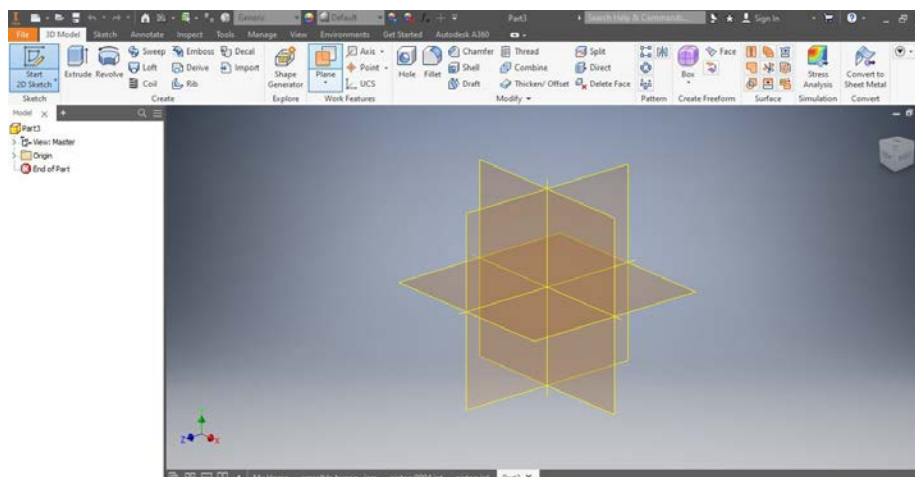


Figura 14: Entorno Autodesk Inventor 2018

Las ventajas que aprovecharemos de este programa residen en el diseño de piezas, y en el ensamblaje de las mismas, las cuales formaran una sola máquina. Gracias a este programa utilizaremos varias opciones de renderizado, y para poder plasmar todo ello, en este proyecto se realizará un estudio fotográfico que lo acredite.

Otra herramienta que se ha utilizado para realizar las oportunas simulaciones, ha sido el software *SolidWorks 2020* de la compañía *Dassault Systemes*. Un potente programa que ayudará a tener una visión más real de la máquina, por su capacidad para realizar simulaciones de fuerzas externas tanto internas que puedan afectar en el funcionamiento.

En el apartado del hardware en la realización de este proyecto se ha utilizado un PC portátil, con un sistema operativo *Windows 10 Home* 64 bits, con un procesador Intel Core i5-4210U a una velocidad de 2,4 GHz, con 8 Gb de memoria RAM, además de una tarjeta gráfica Nvidia Geforce 840M.

Se mencionan estas especificaciones de trabajo ya que para poder mover los diferentes software de diseño y simulación se necesita una buena capacidad de recursos, y aunque este dispositivo portátil ha sido suficiente para poder trabajar con fluidez ha necesitado casi toda la capacidad de memoria del PC. Debido además a varios atajos que dispone el software Inventor para ahorrar el uso de memoria, hemos sido capaces de hacer una reconstrucción virtual estática de la máquina, además de una versión dinámica en la que podemos mover el mecanismo y podemos ver cómo funcionaría virtualmente. Este último dato es complementario ya que con el modelado en 3D de la máquina se observará perfectamente su funcionamiento.

5.3 Modelado Geométrico Bomba de Seis Cilindros

En este apartado desgranaremos la máquina de este estudio, diseñando cada pieza y presentando sus medidas. De este modo abriremos el programa CAD y comenzaremos el proceso. Las operaciones básicas de este programa, como en general de software CAD, consiste en el croquizado, extrusión, vaciado y revolución. En este caso utilizaremos las herramientas pertinentes dentro de la habilidad de manejo que precise el diseñador.

5.3.1 Eje de levas

Comenzamos diseñando el eje donde se encuentran las levas, contará con una forma hexagonal, figura 15 a), (todas las medidas mostradas se considerarán en milímetros), posteriormente este croquis se extruye, figura 15 b). Esta pieza necesita ser de grandes dimensiones ya que va a estar sometida a esfuerzos de torsión constantes, especialmente por las zonas donde cuente con levas ya que el momento producido en esas zonas será mucho mayor.

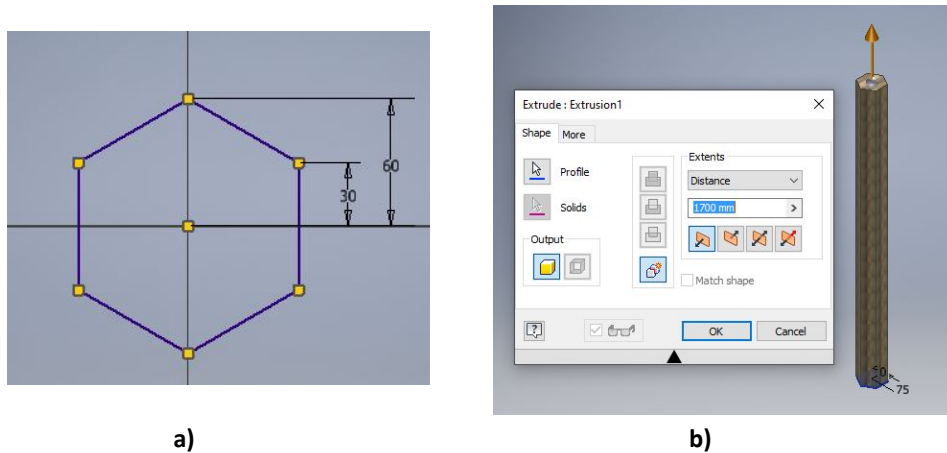


Figura 15: Forma establecida eje de levas

Esta pieza es la encargada de transmitir movimiento a los balancines mediante levas, dado que la máquina cuenta con seis pistones, con sus correspondientes balancines, se extruirá una leva en cada pared del hexágono, figura 16 a), esto quiere decir que cada 60° habrá una leva en este eje y se distribuirán de forma equidistante, figura 16 b).

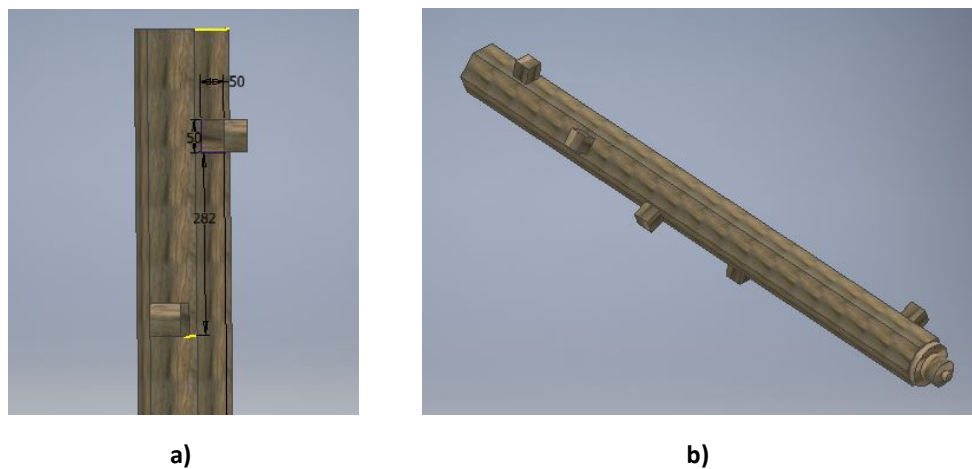


Figura 16: Colocación de levas a lo largo del eje

Como se puede ver en la figura 16 b), en el extremo se han añadido una serie de extrusiones, las cuales se alojan en un bloque de madera para así permitirle el giro, a la vez que descansa el eje en dicho bloque. Por otro lado, en el extremo opuesto, para preparar la parte donde se acoplaría la rueda de cucharas, se ha realizado un vaciado en forma de cuadrado. Con ello, se consigue tanto restringir la rotación como poder girar de forma simultanea como se ve en la figura 17.

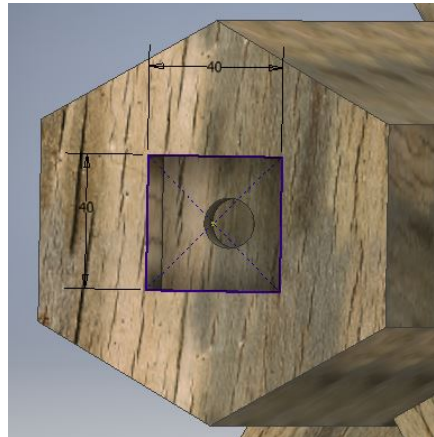


Figura 17: Cogida eje para rueda de paletas

5.3.2 Rueda de cucharas

Esta pieza se encarga de aprovechar la energía cinética que contiene el agua que arrastra un río, en beneficio del movimiento de la máquina. El cálculo de estas energías se realizará en apartados posteriores. Comenzamos el modelado de esta pieza, por el dimensionado de las cucharas, en la figura 18 a), y utilizando la función de revolución sobre un eje, hacemos una revolución de 180°, figura 18 b).

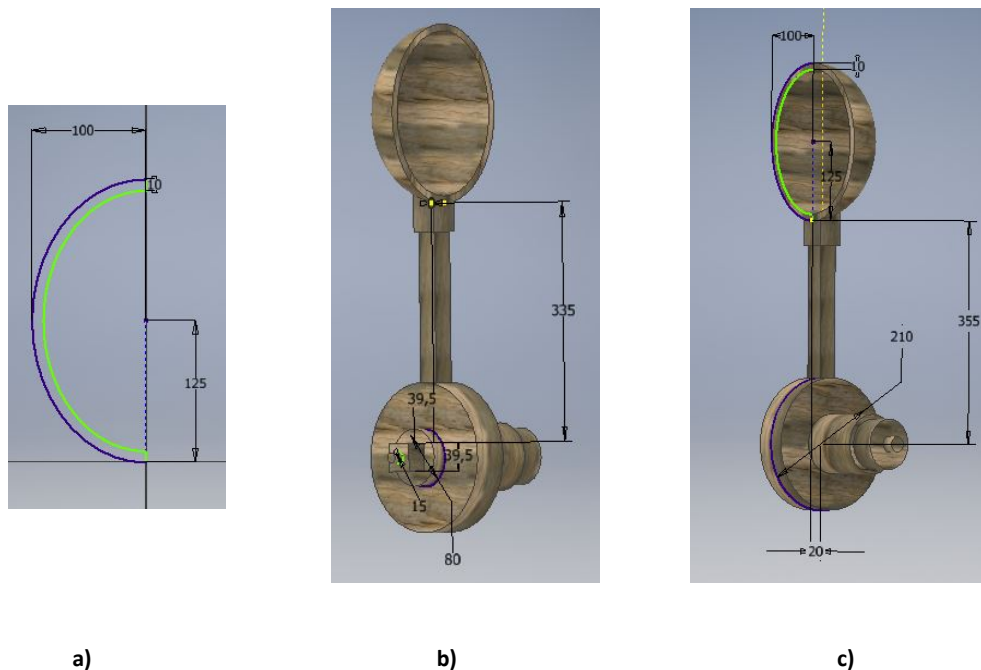


Figura 18: Conjunto paleta - eje de rueda

De la misma manera que el apartado anterior, se ha instalado una serie de extrusiones que permite la revolución de la noria y a la vez permite el descanso de ella sobre otro bloque de madera, figura 17 c).

Para finalizar esta pieza queremos que esta noria cuente con doce paletas, lo que es lo mismo, una paleta cada 30° , como observamos en la figura 19.

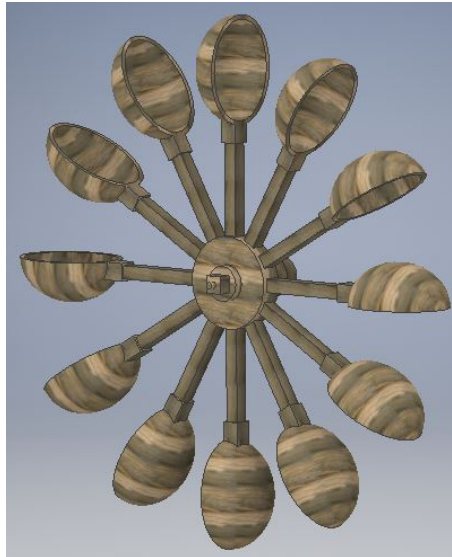


Figura 19: Rueda de paletas

5.3.3 Sistema de tuberías

Este conjunto de conductos compromete la recogida del caudal impulsado por los seis cilindros. Para la confección de este sistema empezáramos por la tubería principal de salida, en ella se unen los diferentes caudales. Así, se quiere destacar esto último en la figura 20, en la que se muestra una visión de corte de la pieza de las sub-tuberías confluyendo en una sola.

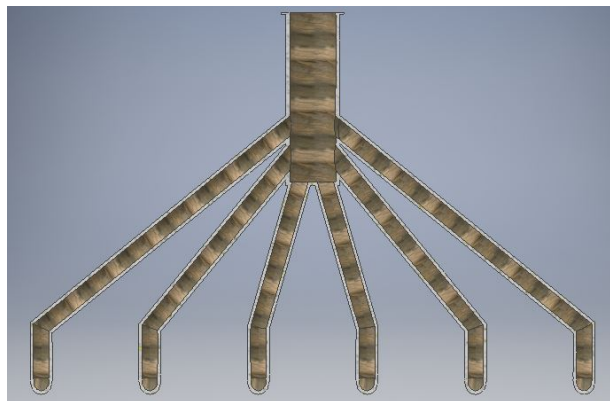
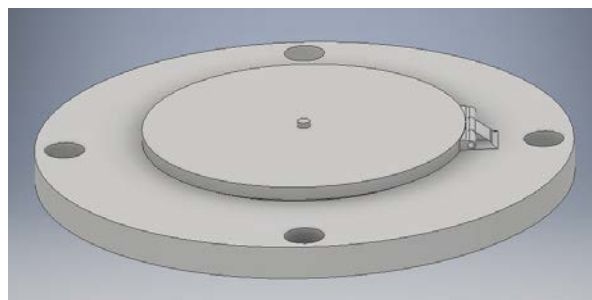


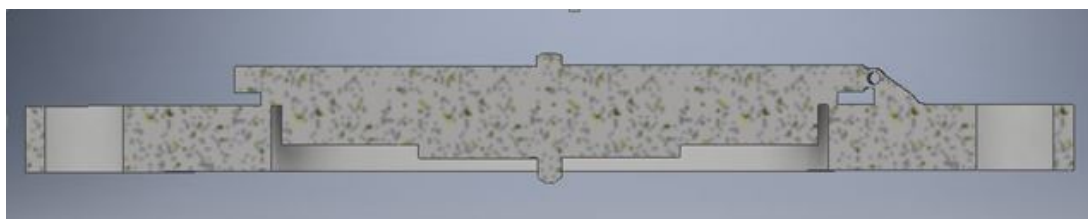
Figura 20: Sección sistema de tuberías

Por otro lado, la conexión con el cilindro tiene que pasar por una válvula clac, (Chambers, 1881), antes mencionada. Este método nos permite un sistema anti retorno del agua impulsada a las tuberías. Debido a su importancia también se diseñará dicha válvula y será instalada en la máquina, como vemos en la figura 21 a), y una mejor vista de corte en la figura 21 b).

La elección de esta válvula anti retorno, se toma con tal de seguir siendo fieles a las indicaciones que Taqī ad-Dīn dejó en su libro *"El Sublime Método de las Máquinas"*.



a)



b)

Figura 21: Válvula Clac

Dado que esta válvula debe de abrirse hacia el sistema de tuberías, se necesita un alojamiento para ello, debido a esto se ha diseñado un aumento del diámetro en el extremo de la tubería que conectaría con los cilindros, figura 22. Este alojamiento permitirá libertad de movimientos a la válvula en su movimiento de abrir y cerrar el paso de agua. También la razón del aumento del diámetro viene dado por la restricción de sección de paso que esta supone, a raíz de lo anterior se consigue que el flujo se vea lo menos afectado posible.

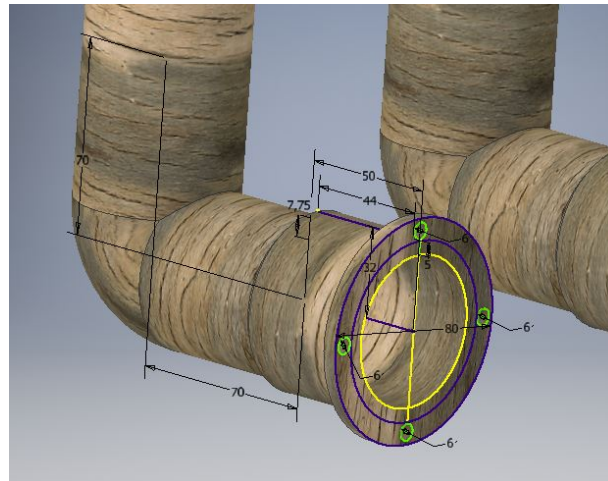


Figura 22: Croquis entrada red de tuberías

Finalmente, el sistema de tuberías quedará dispuesto tal y como se muestra en la figura 23. Si se observa con detenimiento la posición de la válvula en él, se mantendrá cerrada cuando el pistón suba y abierta cuando baje.

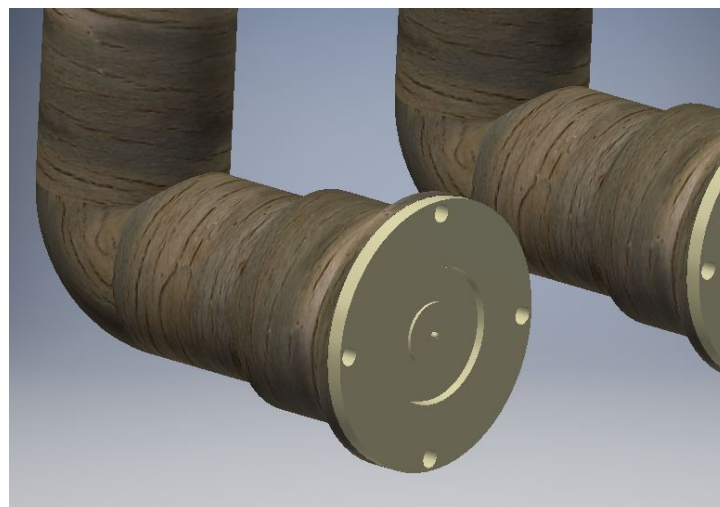


Figura 23: Colocación válvula clac en entrada red de tuberías

5.3.4 Cilindros y Pistones

En este apartado, primero, de forma introductoria describiremos los cilindros. En lo relativo a estos, Taqī ad-Dīn en su obra magna, solo indica que estos deben ser un simple tronco hueco y así se ha considerado. También para su conexión con el sistema de tuberías es preciso instalar un acceso, como vemos en la figura 24.



Figura 24: Cilindro con acoplamiento

Además podemos observar que el cilindro se encuentra abierto en su parte inferior, su razón es la de aspirar el agua que se encuentra debajo de la apertura. Este paso de agua y su restricción, muy importante, se regula también con una válvula clac, la llamada en el apartado 4.1, (como nº 2). Para la colocación de esta válvula en el cilindro se elaborarán unos taladros en la parte inferior del mismo. Y para la sujeción del conjunto se utilizarán tornillos, figura 25. La función de esta válvula es abrirse cuando el cilindro suba hacia arriba, y cerrarse cuando el pistón establezca la compresión del agua que permanece en su interior.



Figura 25: Colocación válvula Clac en base cilindro

Una vez demostrado lo anterior se entra a explicar los pistones del mecanismo, colocados dentro de los cilindros antes mencionados del presente conjunto. La longitud de la carrera del pistón estará comprendida por el ángulo que el eje de levas accione con el balancín. De esta manera, cuando cese el esfuerzo, el pistón desciende hasta que el balancín repose sobre el borde del cilindro hasta un nuevo accionamiento de la leva.

Estas piezas son las encargadas de bombear el agua dentro de las tuberías y a la vez extraerla de la fuente de agua donde se coloque. Debido a que estos elementos soportarán peso adicional y ya que están en una atmosfera húmeda, un metal será mejor decisión que la madera de roble. En consecuencia, por su densidad, propiedades mecánicas y accesibilidad en la época en la que vivió el inventor, el material elegido es el hierro forjado.

Para que las dos cavidades que separa el pistón dentro del cilindro no se comuniquen, se ha implementado una junta, que con unos labios en su parte inferior hace que esta situación no se produzca durante el funcionamiento de la máquina, figura 26.



Figura 26: Junta pistón

Podemos ver en la figura 27, una imagen de corte en que aparece la silueta de la junta con más detalle, su funcionamiento consiste en que cuando el pistón baje y el fluido comience a encontrarse a presión, se expanda por la abertura de la junta. Lo que en consecuencia esa presión del fluido hará que los labios de la junta se unan con más fuerza sobre el cilindro, y quede mucho más estanco el sistema.

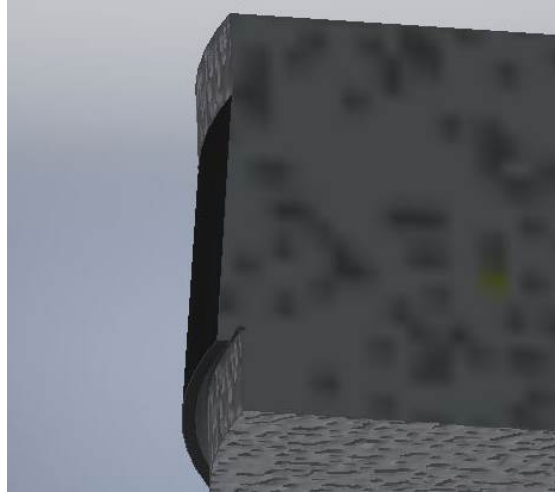


Figura 27: Visión de corte junta de pistón

Ya que se trata de un conjunto cilindro-pistón, con un movimiento de compresión por gravedad, se colocará un peso en el extremo del vástago, normalmente será de un material con una densidad muy alta, en tiempos de Taqī ad-Dīn se consideraría el plomo. Para su colocación se reducirá la sección en este mismo extremo superior, de este modo al encontrar una mayor sección en su paso quedará fijado.

Finalmente, el conjunto del presente apartado tendrá la forma de la figura 9, anteriormente expuesta. En ella se puede ver un perno, esto es, un elemento que se trasladará y rotará mientras sirve de unión entre el pistón y el balancín.

5.3.5 Sistema de barras

En este nuevo apartado se modelará el sistema el llamado sistema de barras. Esta parte de la máquina se encuentra entre los cilindros y el eje de levas. El movimiento de estas barras es de balancín, creando un momento que se transmite cuando la leva empuja la barra hacia abajo, pivotando sobre unos pernos alojados en una estructura, todo ello se ve representada en la figura 28.

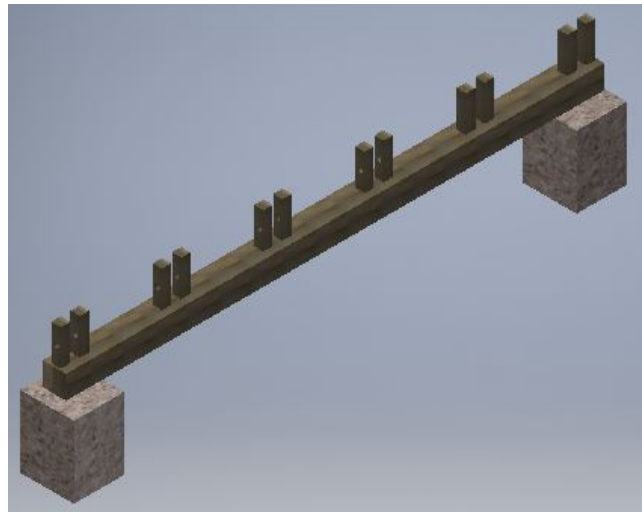


Figura 28: Estructura pivotante de los balancines

Las zapatas de esta estructura se colocaran a la misma altura que las zapatas que soportan al eje de levas junto con la rueda de paletas. Cada barra tiene su espacio, e irán fijadas a este esqueleto mediante dichos pernos.

El balancín en cuestión se tratará de una palanca con una sección cuadrada. Esta forma se mantendrá a lo largo de toda la barra, excepto en el extremo que une con el pistón, figura 29.



Figura 29: Cogida de balancín - pistón

Con esta figura 29, la primera vista representa la planta de la pieza. En ella la abertura que se observa está calculada acorde al diámetro del pistón para que este pueda entrar en él. En la segunda vista de alzado, de igual forma ocurre con el diámetro del perno de unión. La longitud del orificio se debe al

movimiento del perno dentro del balancín, este momento será circular y necesitamos que el pistón se mueva linealmente. Por ello el orificio se hace más grande para que el perno pueda deslizarse y conservar el movimiento lineal. Y así evitar tensiones en el pistón dentro del cilindro.

5.4 Ensamblaje sistema de bombeo

Finalmente, en la figura 30, se puede ver una vista esquemática de como el sistema de barras que integra la máquina se une con el sistema de cilindro – pistón, siendo el corazón de esta máquina.

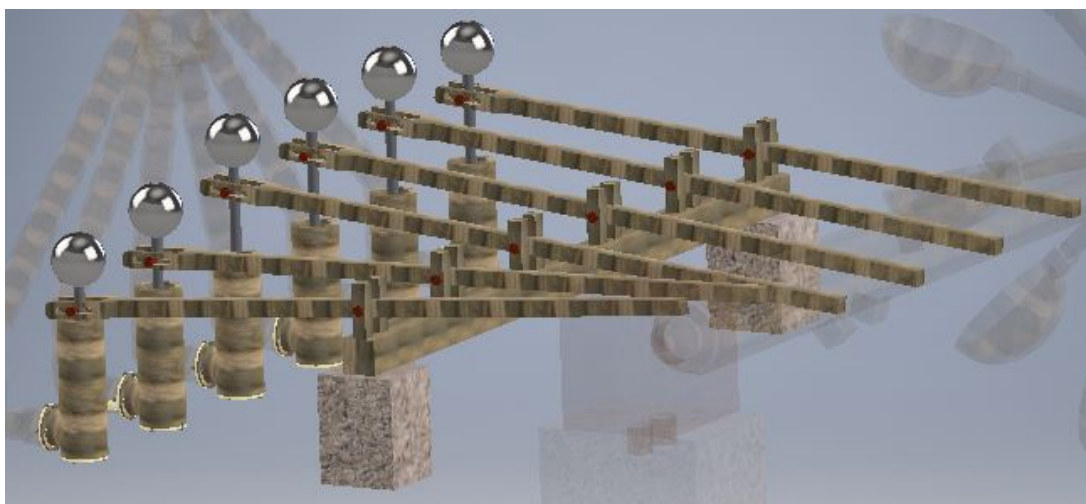


Figura 30: Ensamblaje de pistones y balancines

6 CÁLCULOS

En este siguiente capítulo se expondrán los parámetros con los que la máquina, recreada en el presente TFG, puede llegar a trabajar. Estos cálculos nos llevarán a valorar la usabilidad real del artefacto, cabe matizar de nuevo que, las pocas medidas que ofrece la obra de Taqī ad-Dīn, *“Los Métodos Sublimes para Máquinas Espirituales”*, nos ha llevado a cometer numerosas suposiciones. Por consiguiente, el presente apartado consistirá en, teniendo de base la reproducción antes descrita, analizar la máquina. Para mayor perjuicio o desconocimiento general de la máquina a la hora de afrontar este punto, no disponemos de referencias de reconstrucciones de la misma a una escala considerable. Este hecho abre el debate, de nuevo, si la máquina fue realmente construida y testada, dada la tardía recuperación de las copias de los

Escuela Politécnica Superior de Jaén

manuscritos originales (Al-Hassani, 2009), o solo fue plasmada en dicho manuscrito a modo de ocurrencia.

6.1 Análisis Cinemático

Una vez determinada la estructura del mecanismo, resulta de gran utilidad presentar el esquema cinemático simbólico. En este podemos ver posibles acoplamientos entre los diferentes grupos estructurales, unido al número de eslabones y su grado de libertad. Este esquema nos puede aportar aún más información de una manera más visual, como los pares existentes entre eslabones, su condición y entre qué eslabones existe movimiento independiente de entrada, (Prieto, 2018).

El esquema cinemático simbólico de nuestra máquina se muestra en la figura 31, se trata de un croquis en que se puede ver la enumeración de los eslabones, la ubicación de sus juntas y donde se encuentran sus centros instantáneos de rotación.

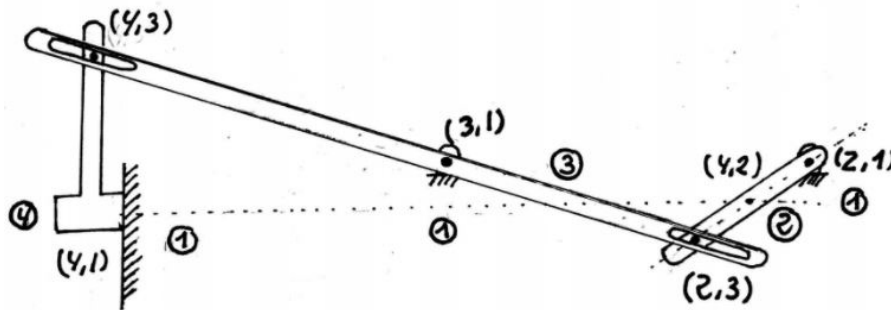


Figura 31: Croquis esquema cinemático simbólico

Para determinar el número de grados de libertad que posee el mecanismo, es necesario seguir la ecuación de Gruebler, (Norton, 2013):

$$GDL = 3 \cdot (n - 1) - 2 \cdot J$$

Siendo “n” el número de eslabones y “J” el número de juntas del mecanismo. El número de eslabones serán cuatro en nuestro caso, y el número de juntas se obtendrá prestando atención a cada una de las uniones.

- Junta (1,2): junta completa de rotación.
- Junta (2,3): semi-junta (pasador).
- Junta (3,1): junta completa de rotación.
- Junta (4,3): semi-junta (pasador).
- Junta (4,1): Junta completa de traslación

Para el recuento de las juntas se determina el criterio de forma. Para las juntas completas su valor será uno y para las semi-juntas el valor será la mitad, cero con cinco. Quedando la fórmula tal que así:

$$GDL = 3 \cdot (4 - 1) - 2 \cdot 4 = 1$$

El mecanismo se compondrá de tres juntas completas y dos semi-juntas con un grado de libertad en ellas.

Las posiciones críticas observables en este mecanismo consistirán en la posición de prolongación del eslabón dos y tres, la posición de paralelismo del eslabón dos con el bastidor y también el eslabón tres con el bastidor.

Para determinar la condición de cada eslabón es necesario acudir a la ley de Grashof, que dado el mecanismo de cuatro barras, determinará si una de ellas es capaz de determinar giros completos con respecto al bastidor. Comprobando si se trata de una cadena cinemática de clase I, al cumplir dicha ley, o cadena cinemática de clase II, en caso contrario. Así, gracias al empleo de dicha ley es necesario conocer las dimensiones de los eslabones. La escala que se ha utilizado para obtener estos datos parte de la premisa de los dos únicos datos que Taqī ad-Dīn plasmó en su obra, figura 32, todas las medidas del proyecto se expondrán en un anexo I.

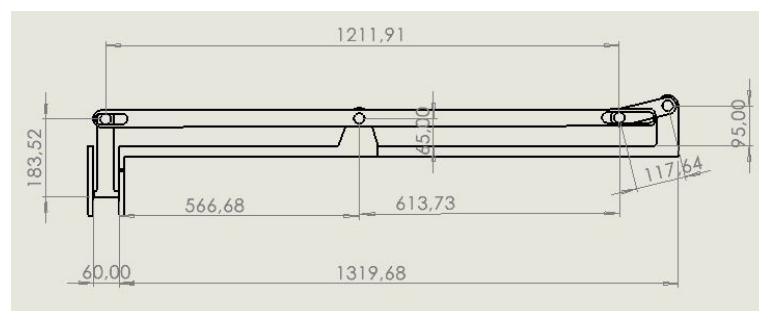


Figura 32: Medidas del esquema cinemático simbólico

La fórmula que Grashof plantea, consiste en que la suma del eslabón más largo y el eslabón más pequeño, tienen que ser menores a la suma de las dos medidas intermedias restantes. En lo relativo a lo que representa el esquema y fijándonos en la numeración del croquis de la figura 31:

- Eslabón 1 (Bastidor): 1319,68 mm
- Eslabón 2: 117,64mm
- Eslabón 3: 1211,91 mm
- Eslabón 4 (Corredera): Según Grashof este valor se extiende hasta el infinito.

$$\text{Largo} + \text{Corto} \leq \text{Intermedio 1} + \text{Intermedio 2}$$

Después de observar los datos llegamos a la conclusión de que no cumple la condición de Grashof y el mecanismo de cuatro barras se trata de un triple balancín y bastidor, ninguno de los eslabones ejecutará giros completos.

Siguiendo las directrices de las recreaciones de la bomba de seis cilindros por ordenador ejecutadas por Salim Al-Hassani, Mohammed A. Al-Lawati en 2009, acarrea que la carrera del pistón sea la que aparece en la figura 33. De una parte, el inicio de esta se da cuando la leva ejerce la fuerza sobre el balancín, elevando el pistón. Por otra, el final de la carrera sucede en el momento que el balancín que está unido al pistón, descansa en el borde del cilindro, de la manera que muestra la figura 9, antes mencionada. Con una simulación de movimientos en *Autodesk Inventor*, se determina la carrera del pistón dentro del cilindro, como se observa en la figura 33, se trabajará con una carrera de 111,212 milímetros.

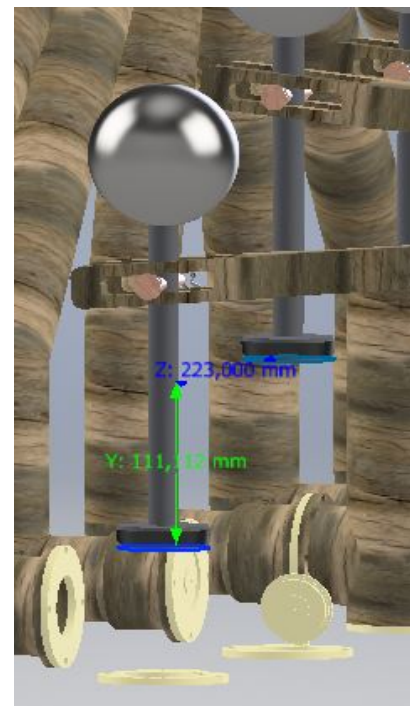


Figura 33: Carrera del pistón en el cilindro

Una vez averiguada esta medida se procede a calcular el ángulo de acción del eje de levas sobre los balancines, con un resultado de 68,88°. Los

instantes antes y después de golpear el balancín vienen expresados esquemáticamente en la siguiente figura 34.

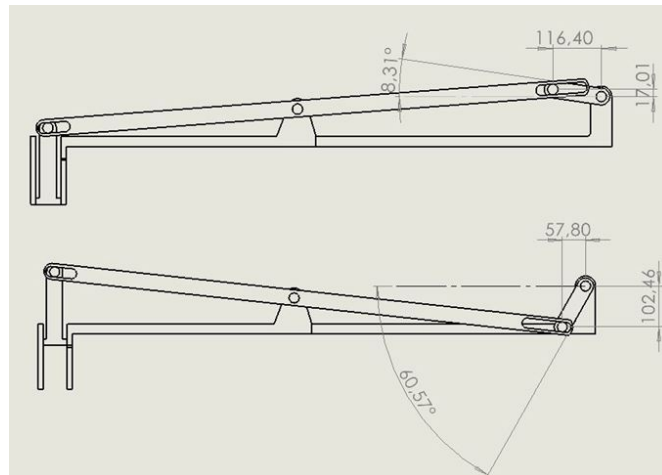


Figura 34: Determinación de ángulos para la carrera asignada

6.2 Cálculo del peso de las plomadas

Tras la exposición del análisis cinemático, resulta crucial para el funcionamiento correcto de la máquina, determinar el peso mínimo que deben tener las plomadas que se encuentran encima de los pistones. Esto es así, porque será la acción de la gravedad sobre esta plomadas la que proporcionará la presión necesaria que bombee el fluido hacia las tuberías en el tiempo requerido.

Así, si bien el peso de las seis plomadas será idéntico, no lo será el peso del fluido que circulará por las tuberías. Por ejemplo, las tuberías más centradas se encuentran justo debajo del depósito, lo que implica que, en el caso de máxima flujo se tendrá que superar el peso del depósito lleno de agua, más el de las tuberías, para poder seguir bombeando agua. Con la ayuda de varios comandos de *Autodesk Inventor*, se ha podido hallar el volumen de las tuberías, y se ha comprobado que el máximo volumen es el que soportará la rama central de las tuberías, como vemos en la figura 35.

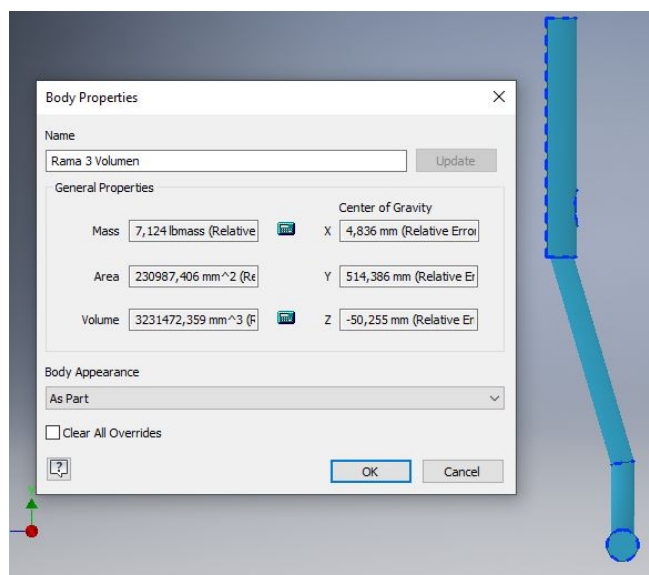


Figura 35: Ejemplo volumen columna de agua tubería

Este dato corresponde al volumen que albergaría una de tuberías centrales más la mitad del depósito. De este modo, el total se repartiría entre las dos, por lo que dividimos para obtener el volumen máximo apropiado. En la tabla 1, se muestran tanto los volúmenes máximos cuando, cuando las tuberías están llenas de agua, como estas multiplicadas por su densidad, 1000 kg/m³, obteniendo la masa.

Rama Tuberías	Volumen unitario (mm ³)	Masa (kg)
Exterior	1612776	1,61
Intermedia	1246390	1,24
Interior	3231472	3,23

Tabla 1: Volumen y masa de columna de agua sistema de tuberías

Con estas cifras se destaca que la rama interior es la zona que más fluido va a soportar sobre la válvula clac una vez llena por completo, contando el depósito, por las propiedades de los fluidos. Por ello para seguir bombeando agua, se tiene que vencer esa presión que hay en la válvula clac.

$$\text{Peso} = \text{masa} \cdot \text{gravedad}$$

$$\text{Peso} = 3,23 \text{ kg} \cdot 9.8 \text{ N/kg} = 31,654 \text{ N}$$

Esta fuerza de peso es la necesaria para igualar las presiones a ambos lados de la válvula clac, y que así pueda circular el fluido. En este punto entramos a evaluar el caudal que se necesita en esta bomba, por lo que es conveniente saber la velocidad angular de la rueda de paletas. Con este dato se obtendrá el tiempo para que el pistón pueda recorrer entera su carrera sin que sea interrumpido por otra vuelta del eje de levas.

Para ello se realizará un balance entre la velocidad del río que accione las paletas, y la velocidad de bajada del pistón. Si tomamos una velocidad del río de 1,5 m/s y se tiene un radio de paletas de 600 mm, la velocidad angular tendrá un valor:

$$\text{Velocidad angular} = \text{velocidad lineal río} / \text{radio paletas} = 2,5 \text{ rad/s}$$

Como hemos calculado anteriormente el ángulo de acción que necesita la leva para accionar el balancín se restará de la vuelta completa. Mientras que el ángulo restante junto con la velocidad angular del eje de levas, unido a la rueda de paletas, nos proporcionará el tiempo disponible

$$\text{Ángulo acción leva} = 68,88^\circ$$

$$\text{Ángulo restante} = 360^\circ - 68,88^\circ = 291,12^\circ = 0,808 \text{ vueltas}$$

Pasamos los radianes a vueltas/s:

$$2,5 \text{ rad/s} \cdot 1 \text{ vuelta} / 2 \pi \text{ rad} = 0,39 \text{ vueltas/s}$$

Entonces con una simple división obtenemos el tiempo que tarda un balancín en volver a ser accionado:

$$0,808 \text{ vueltas} / 0,39 \text{ vueltas/s} = 2,07 \text{ s}$$

Así, conociendo la carrera del pistón, la velocidad que necesita la plomada junto al pistón para hacer todo su recorrido es:

$$\text{Velocidad del pistón} = 0,11 \text{ m} / 2,07 \text{ s} = 0,053 \text{ m/s}$$

Como se observa en la figura 36 hay varios cambios de sección a lo largo de la instalación, contando además con un depósito amplio, donde se aprecia

otro cambio de sección. Cada rama tiene una longitud diferente por lo que las pérdidas de carga de la instalación serán diferentes en cada rama.

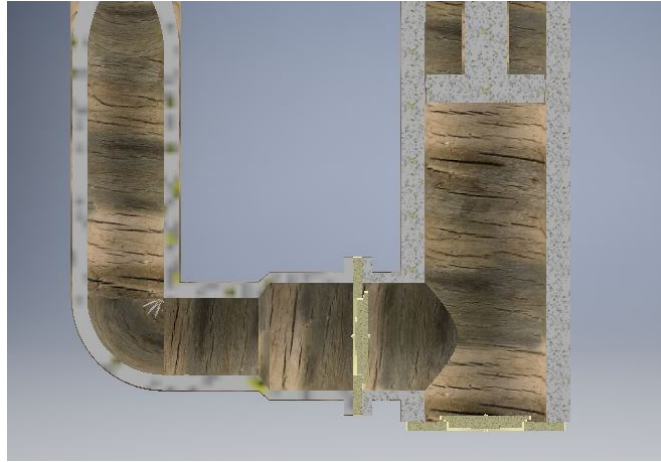


Figura 36: Variación de sección cilindro - tubería

Se calcularán las pérdidas en cada rama, para observar cual será el máximo valor, como ya se hizo en los cálculos anteriores.

El pistón baja con una velocidad de 0,053 m/s, lo que quiere decir que el caudal que circulará por cada cilindro y rama de tubería será:

$$Q = V_{\text{Fluido}} \cdot S_{\text{Cilindro}}$$

$$S_C = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot (0,03 \text{ m})^2 = 2,83 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$Q_{\text{unitario}} = 0,053 \text{ m/s} \cdot 2,83 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

La fórmula de par hallar las pérdidas de carga de la instalación es la siguiente, (Zamora, 2016):

$$\Delta H_{\text{inst}} = (8 \cdot Q^2 / \pi^2 \cdot g \cdot d^4) \cdot (\lambda \cdot (L/d) + \sum K_i)$$

d = diámetro (m)

L = longitud (m)

λ = coef. Pérdidas de presión por fricción (Re, ξ/d)

K = coef. Pérdidas de presión por torbellinos

El coeficiente de pérdidas por fricción usualmente se calcula con la fórmula de Darcy-Colebrook:

$$\lambda = 0,25 / (\log ((\xi/d)/3,7 + 2,51/Re \cdot \sqrt{\lambda}))^2$$

ξ = rugosidad absoluta (m)

$$Re = (\rho \cdot d \cdot V) / \mu$$

μ = viscosidad absoluta ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

A modo de recapitulación de los datos de todos los caminos que el fluido recorre a lo largo de la instalación en diferentes secciones, se realiza la tabla 3. Donde se dejará constancia de todos los datos utilizados en los cálculos. Para ello utilizaremos la ecuación de continuidad, para averiguar las diferentes velocidades:

$$Q_1 = Q_2$$

$$V_1 \cdot S_1 = V_2 \cdot S_2$$

También hay exponer algunos coeficientes:

μ = viscosidad absoluta agua = $10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

ξ = rugosidad absoluta madera = 0,18 – 0,9 mm, se utilizará un término medio; ξ = 0,54 mm.

Para las pérdidas de presión por torbellinos, ΣK_i , he utilizado la siguiente tabla 2, (Rodríguez, 2018):

Elementos	Coef. pérdidas, K
Válvula Anti retorno	1
Codo 90°	0,2
Desviación	0,3
Entrada depósito	1
Salida depósito	1

Tabla 2: Constantes de pérdidas de presión en tuberías

En esta mencionada tabla 3 se expondrán además los valores dependientes para el cálculo de las pérdidas de carga de la instalación:

	Longitud (m)	Diámetro (m)	Sección (m ²)	Velocidad (m/s)	Re	λ	ΣK_i	ΔH (m)
Cilindro	0,150	0,06	0,00282	0,053	3180	0,05	0,2	$4,66 \cdot 10^{-5}$
Rama interior	0,665	0,0425	0,00142	0,105	4462,5	0,05	2,5	$1,87 \cdot 10^{-3}$
Rama intermedia	0,826	0,0425	0,00142	0,105	4462,5	0,05	2,5	$1,98 \cdot 10^{-3}$
Rama exterior	1,089	0,0425	0,00142	0,105	4462,5	0,05	2,5	$2,15 \cdot 10^{-3}$
Depósito (6 Tuberías)	0,450	0,120	0,0113	0,013	9360	0,037	1	$9,19 \cdot 10^{-5}$

Tabla 3: Pérdidas de carga en sistema de tuberías

Por lo tanto, de las tres ramas por las que el fluido puede entrar al depósito, es por la exterior por las que las pérdidas por carga son más grandes, siendo la suma resultante:

$$\Delta H_{inst} = H_{cilindro} + H_{T.exterior} + H_{depósito} = 2,288 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Para el cálculo del peso de las plomadas en los cilindros, hay que averiguar la potencia que ejerce cada uno. Para ello utilizaremos la siguiente fórmula de potencia útil, (Zamora, 2016).

$$P = \rho \cdot g \cdot Q_{unitario} \cdot H_{máx}$$

La $H_{máx}$, consistirá en la altura máxima que tendría que ascender el fluido,

$$H_{máx} = H_g + H_2 + \Delta H_{inst}$$

$$\text{Volumen ascendido (depósito)} = H_2 \cdot S_{\text{depósito}}$$

$$\text{Volumen descendido (cilindro)} = H_1 \cdot S_{\text{cilindro}}$$

$$H_{\text{máx}} = H_g + (H_1 \cdot S_{\text{cilindro}}) / S_{\text{depósito}} + \Delta H_{\text{inst}} = 0,97 \text{ m} + (0,11 \text{ m} \cdot 0,00282 \text{ m}^2) / 0,0113 \text{ m}^2 + 2,288 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 0,999 \text{ m} \approx 1 \text{ m}$$

$$P = 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,8 \text{ N/kg} \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1 \text{ m} = 1,47 \text{ N} \cdot \text{m/s} = 1,47 \text{ W}$$

$$P = \text{Fuerza} / \text{Velocidad}$$

$$\text{Fuerza} = 1,47 \text{ N} \cdot \text{m/s} / 0,053 \text{ m/s} = 27,73 \text{ N}$$

Esta fuerza es la necesaria para cumplir los requisitos del descenso del pistón. A esta fuerza habría que sumarle el esfuerzo necesario para igualar las presiones a ambos lados de la válvula clac, calculado anteriormente.

$$\text{Esfuerzo} = 27,73 \text{ N} + 31,654 \text{ N} = 59,384 \text{ N}$$

Una vez calculado esta fuerza es oportuno centrarse en las fuerza de rozamiento del pistón con el cilindro, “El rozamiento del pistón en un movimiento equivale a un valor comprendido entre 3% y el 10% de la fuerza calculada” (Creús, 2011). Por ello se decide recalcular con un 5%.

$$\text{Esfuerzo total} = (59,384 \text{ N} \cdot 0,05) + 59,384 \text{ N} = 62,35 \text{ N}$$

Para ajustar aún más este cálculo, se hallarán las condiciones del vástago, ya que posee un peso que se le podrá descontar al esfuerzo total. Lo primero que se va a hacer es ver su volumen, con la misma herramienta de Autodesk Inventor antes utilizada para las tuberías, figura 37.

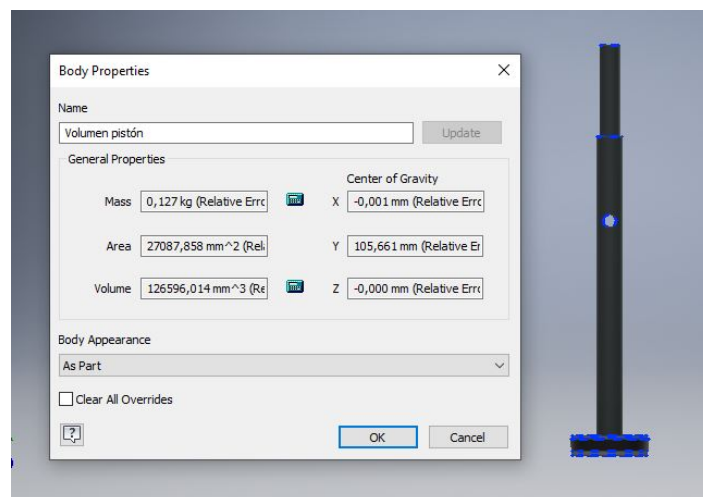


Figura 37: Volumen pistón

Si se atiende al volumen del sólido, tratándose este de hierro forjado su densidad es 7784 kg/m^3 . Por lo que deja un peso de 0,985 kg. Antes de ajustar, se va comprobar el vástago del pistón, ya que cualquier pieza esbelta sometida a esfuerzos de compresión, corre el riesgo de sufrir el fenómeno de pandeo. Para el cálculo del diámetro se va a recurrir a la Teoría de Euler, que relata que para un diámetro concreto del vástago del pistón, la fuerza máxima que puede soportar sin que padezca de pandeo, (Rodríguez, 2018):

$$F = K / S$$

Siendo F , la carga máxima (kg), K será la carga de pandeo (kg) y S el coeficiente de seguridad.

$$K = \pi^2 \cdot E \cdot I / L^2$$

Siendo E , el módulo de elasticidad, I momento de inercia de la sección transversal del vástago y L la longitud de pandeo del vástago, que viene dada por la siguiente tabla según su cogida, figura 38.

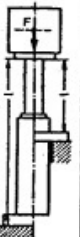
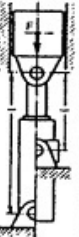
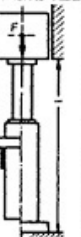
Solicitaciones según Euler				
Solicitaciones según Euler	Caso 1 Un extremo libre, un extremo fijo	Caso 2 (básico) Dos extremos articulados	Caso 3 Un extremo articulado, un extremo fijo	Caso 4 Dos extremos fijos
Gráfico				
Longitud libre de pandeo	$s_K = 2l$	$s_K = l$	$s_K = l \cdot \sqrt{\frac{1}{2}}$	$s_K = \frac{l}{2}$
Situación de montaje del cilindro	 Forma de sujeción C, D, F, H, K L, M, N, P, Q, T	 Forma de sujeción B, E, G, R, S	Indicación: Guiado cuidadoso de la carga, posible bloqueo  Forma de sujeción C, D, F, H, K L, M, N, P, Q, T	Indicación: Desfavorable; gran posibilidad de bloqueo  Forma de sujeción C, D, F, H, K L, M, N, P, Q, T

Figura 38: Cálculo longitud libre de pandeo (www.ingemecanica.com)

Como se aprecia en la figura 38, el caso numero uno corresponde al caso que estamos calculando por lo que la longitud libre de pandeo será dos veces la longitud del vástago. Conociendo el módulo de elasticidad del hierro forjado, $1,9 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2$ y tratándose de un vástago de longitud 30 cm, se despeja en la fórmula.

$$I = \pi \cdot d^4 / 64$$

$$S = 3,5$$

$$F = [\pi^2 \cdot E \cdot I / L^2] / S = [\pi^2 \cdot 1,9 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2 \cdot (\pi \cdot d^4 / 64) / (2 \cdot 30 \text{ cm})^2] / 1,1 = 62,35 \text{ N} / 9,8 \text{ N/kg}$$

$$d = 0,54 \text{ cm}$$

Se observa que según la Teoría de Euler, el diámetro mínimo para afrontar estas condiciones con seguridad. En el diseño se había preestablecido un diámetro de 2 cm, ya que existe un agujero que lo atraviesa y necesitamos rigidez en las paredes, a modo de comprobante, simularemos el esfuerzo cortante en el programa *SolidWorks*, en la tabla 4, se pueden observar los parámetros mecánicos para llevar a cabo esta simulación, que corresponden al hierro forjado.

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	190000	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.27	N/D
Módulo cortante	86000	N/mm ²
Densidad de masa	7300	kg/m ³
Límite de tracción	413.613	N/mm ²
Límite de compresión		N/mm ²
Límite elástico	275.742	N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica	1.2e-05	/K

Tabla 4: Propiedades hierro forjado (*SolidWorks*)

A continuación se indicarán varias acciones o pruebas realizadas. En primer lugar un análisis estático del pistón, en una simulación con las medidas exactas de la pieza. Además, se aplicarán restricciones en la base del pistón y se aplicará el esfuerzo cortante en el extremo superior del vástago. La carga corresponderá a 62,35 N. La acción de la gravedad estará presente en este estudio. El proceso de mallado será triangular y automático, y se ha afinado en las dimensiones de estas geometrías para obtener una malla fina, con una tolerancia de 0,1577 milímetros.

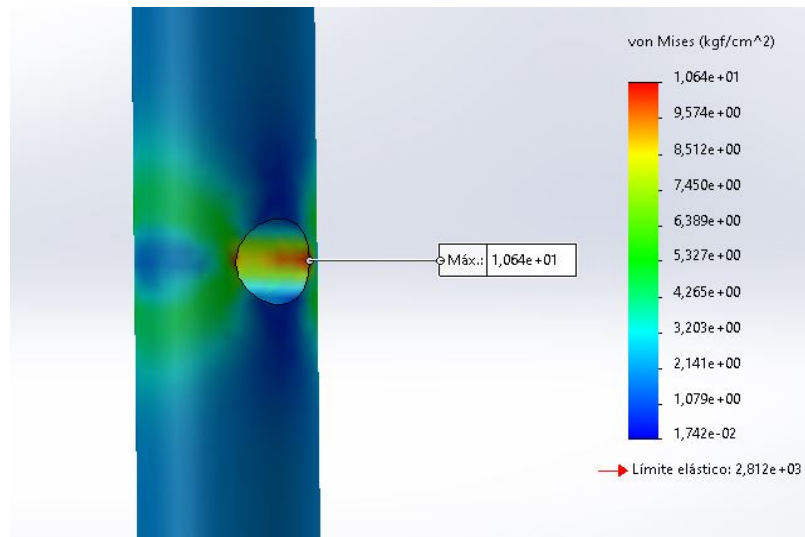


Figura 39: Mapa de tensiones, Von Mises, para cilindro

En esta figura 39, se puede observar el mapa de tensiones de von Mises con unas unidades de kg/cm^2 . Este mapa nos clarifica como afecta el orificio hecho para los pernos de cogida. Un menor diámetro del vástago, habría llevado a superar el límite elástico de la pieza. Con esta elección de diámetro de 20 mm, nos aseguramos una cogida segura entre vástago y balancín, por medio del perno, y como vemos en el gráfico la máxima tensión está muy lejos del límite elástico. También podemos observar el perímetro de la zona con menos material alrededor del agujero, y como en esa zona la tensión es mínima.

En segundo lugar, después de esta comprobación, es sensato recalcular el esfuerzo total necesario para realizar el movimiento del pistón según las condiciones que se establecieron al principio del apartado. Por tanto, se restará la carga del peso del propio pistón en favor de reducir el diámetro de las plomadas.

$$\text{Esfuerzo total}^* = \text{Esfuerzo total} - \text{Carga Pistones}$$

$$\text{Esfuerzo total}^* = 62,35 \text{ N} - (0,985 \text{ kg} \cdot 9,8 \text{ N/kg}) = 52,7 \text{ N}$$

El cálculo de las dimensiones de las plomadas será el siguiente:

$$\text{Peso total}^* = 52,7 \text{ N} / 9,8 \text{ N/kg} = 5,37 \text{ kg}$$

$$\text{Densidad del Plomo} = 11340 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Volumen} = \text{Masa} / \text{Densidad} = 5,37 \text{ kg} / 11340 \text{ kg/m}^3 = 0,000474 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen Esfera} = (4/3) \cdot \pi \cdot R^3$$

$$R_{\text{plomada}} = \sqrt[3]{(0,000474 \text{ m}^3 \cdot 3/(4 \pi))} = 0,0484 \text{ m} = 48,45 \text{ mm}$$

Ya que la plomada encaja en el vástago del pistón, hay que hacer un ajuste, ya que hay volumen desalojado.

$$R_{\text{eje pistón}} = 8 \text{ mm}$$

$$L_{\text{alojamiento}} = 96 \text{ mm}$$

$$\text{Volumen desalojado} = S_{\text{eje}} \cdot L = \pi \cdot 8^2 \cdot 96 \text{ mm} = 19301,95 \text{ mm}^3$$

$$\text{Volumen total} = (4/3) \cdot \pi \cdot 48,45^3 \text{ mm}^3 + 19301,95 \text{ mm}^3 = 495600 \text{ mm}^3$$

$$R_{\text{recalculado}} = \sqrt[3]{(495600 \text{ mm}^3 \cdot 3/(4 \pi))} = 49,1 \text{ mm}$$

Como conclusión el radio real de las plomadas, para poder cumplir la condición de compresión del fluido dentro del cilindro en el tiempo establecido será de 49,1 mm, con un peso final ya indicado de 5,37 kg.

6.3 Estudio de movimiento

Para este estudio de movimiento se ha recurrido de nuevo al programa *SolidWorks*. Porque se quiere conocer a que tipo de condiciones puede estar sometida la estructura, y poder hacer un reajuste de las medidas o un cambio en la elección del material. Se va a realizar una simulación del movimiento de la máquina en el momento en que las levas accionan el balancín. Es un momento en el funcionamiento de la máquina que debe ser analizado detenidamente.

En primer lugar se ha reproducido el esquema cinemático simbólico, en el entorno de *SolidWorks*, como se aprecia en la figura 40. Las distancias de esta máquina son las mismas que la reproducción virtual hecha anteriormente en *Autodesk Inventor*.

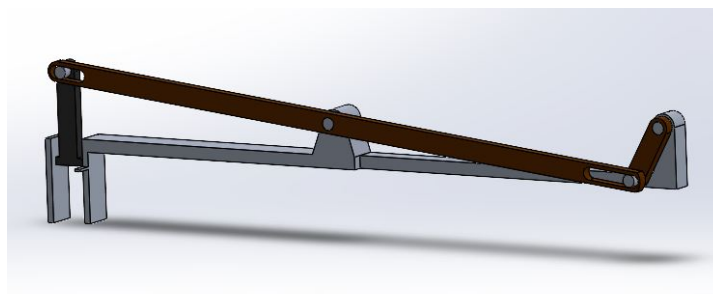


Figura 40: Esquema cinemático simbólico con propiedades de materiales

Para una mayor exactitud se han aplicado condiciones mecánicas a las partes móviles, como las que tendría el material de las que están hechas. De tal manera que los balancines y el eje de levas son de madera de roble, se les han aplicado las siguientes condiciones, tabla 5. Y para el pistón de hierro forjado se le ha aplicado las ya nombradas en la tabla 4.

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	13238.9775	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.29	N/D
Módulo cortante		N/mm ²
Densidad de masa	710	kg/m ³
Límite de tracción		N/mm ²
Límite de compresión		N/mm ²
Límite elástico	51.9752	N/mm ²

Tabla 5: Propiedades roble (SolidWorks)

La parte más vulnerable de esta máquina puede llegar a ser los balancines, por ese estrés, que provocaría al material, el continuo movimiento de vaivén. Por esta razón es la primera pieza a analizar. Con una velocidad, ya calculada anteriormente, de 2,5 rad/s o lo que es lo mismo 23,87 rpm, en la reducción de lo que sería el eje de levas. Y una fuerza contraria al movimiento de 52,7 N ubicada en el pistón, se elige este valor porque se tiene en cuenta las consecuencias de la gravedad en el sistema. En este análisis no se ha añadido la fuerza de absorción que tendría la subida del pistón dentro del cilindro, pero se hará una estimación más adelante.

En la siguiente figura 41, podemos ver la parte más vulnerable de los balancines, y es la cogida con el pistón. Elegimos el mapa de tensiones de von Mises, en el punto donde la aceleración es máxima, con un valor de tensión de $1,8 \cdot 10^7$ N/m², como se ve no supera el límite elástico de $5,19 \cdot 10^7$ N/m². Hay

que tener en cuenta que en la simulación se simplifica a una cogida, pero en la realidad se divide en dos, con un mayor reparto de las tensiones.

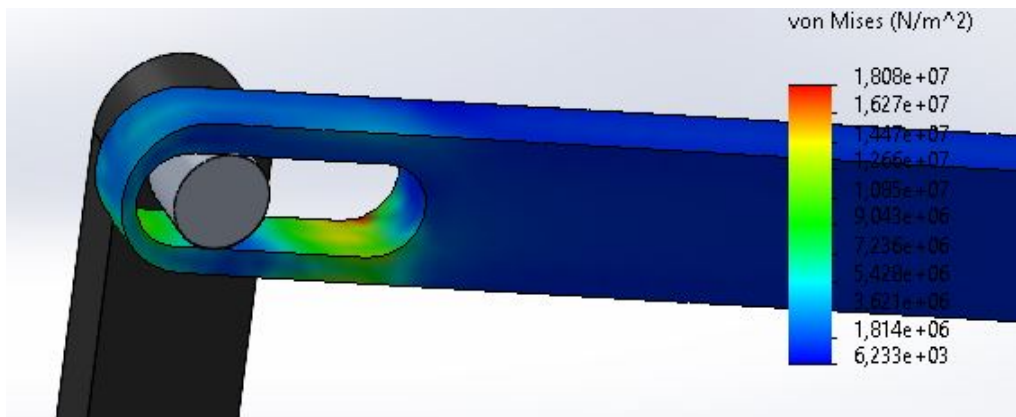


Figura 41: Mapa de tensiones, Von Mises, cogida balancín - pistón

Continuamos con el análisis de línea que accionaría los balancines en el eje de levas. Esta pieza es muy robusta y aún con esta simplificación se puede mostrar con el gráfico de von Mises, donde las tensiones se reparten sobre toda la pieza pero tiene su máximo en el contacto con el balancín, con un valor de $7,22 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ es un valor muy inferior al límite elástico, como podemos ver en la figura 42.

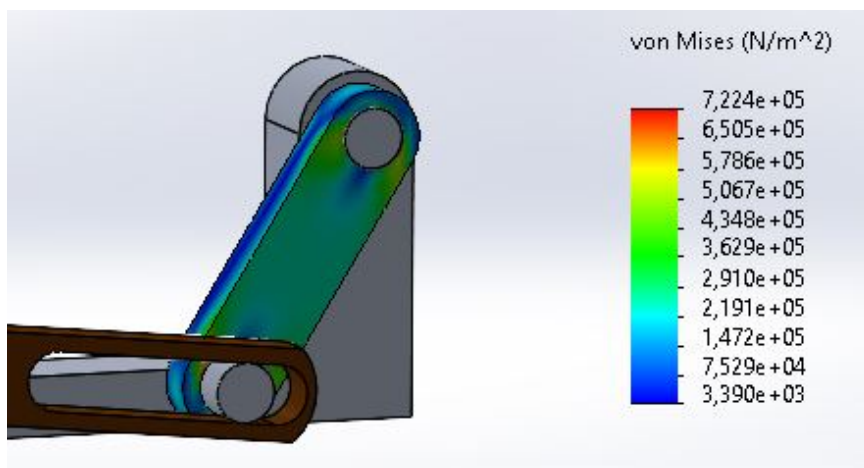


Figura 42: Mapa de tensiones, von Mises, de leva

Y como último cálculo se estimará la fuerza de absorción del pistón sobre el cilindro, y como consecuencia la entrada del agua. Para ello se estudiará el movimiento del pistón, y puesto que solo se mueve en la dirección vertical, figura 43.

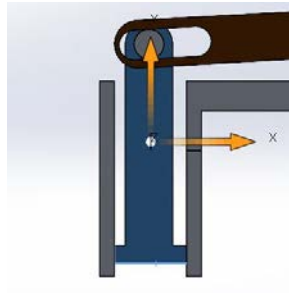


Figura 43: Posicionamiento de ejes en pistón

Este pistón contará con una velocidad lineal en la dirección vertical, representada en la figura 44.

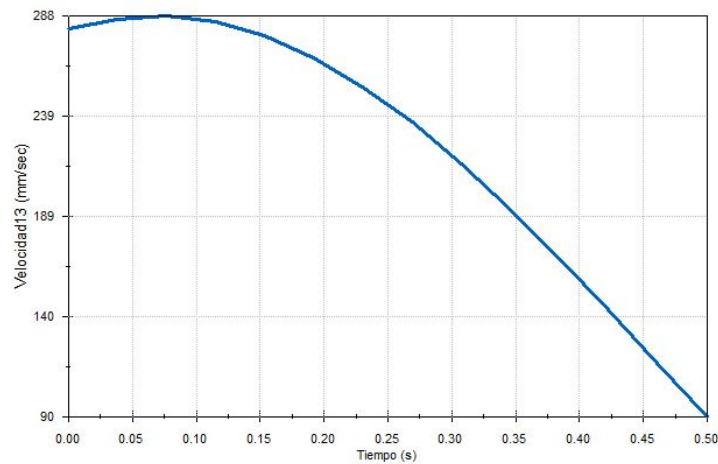


Figura 44: Gráfica velocidad lineal del pistón

Se puede observar en la gráfica de la figura 44 como el pistón tiene una velocidad muy fuerte al principio, cuando el eje de levas conecta con el balancín, ejerce toda su fuerza en los primeros instantes. Como es un simple contacto entre ellos, el eje de levas puede seguir en contacto con el balancín pero sus posiciones serán cada vez más perpendiculares entre ellas y no se ejercerá fuerza. Ya que la velocidad depende del tiempo, se saca con ayuda de *Microsoft Excel 2013*, la ecuación de esa curva característica. Siendo la formula la siguiente:

$$\text{Velocidad (mm/s)} = 1055 \cdot t^3 - 1763,5 \cdot t^2 + 232,69 \cdot t + 280,65$$

$$R^2 = 0,9993$$

Con un coeficiente de regresión muy próximo a la unidad lo que quiere decir que la ecuación polinómica de orden tres se ajusta bastante bien a la realidad.

En la siguiente gráfica se plasmará las componentes de la aceleración, ya que dispone de aceleración tangencial y normal o centrípeta. Para hallar la gráfica del módulo de la aceleración, se tendrá que hallar la resultante de estos dos vectores, en la figura 45, podemos ver una comparativa de ellas. Hay que tener cuidado al observarla ya cada una posee unos valores en el eje vertical distintos y muy distanciados.

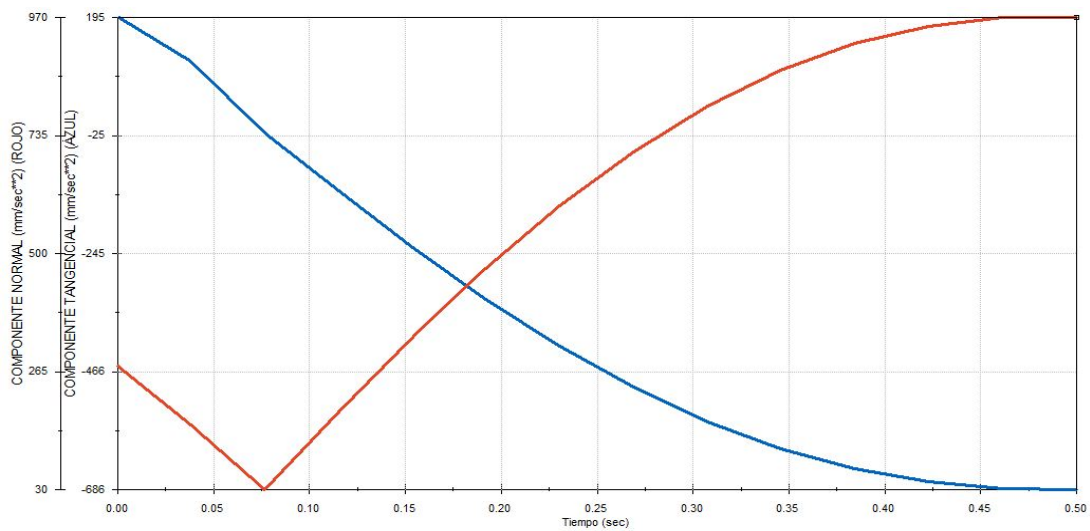


Figura 45: Gráfica comparativa de aceleración tangencial y normal

La resultante de estas curvas de aceleración se puede observar en la figura 46. En esta representación se puede observar cómo se vence la inercia del pistón y de las plumadas pero cuando las levas cesan en su transmisión de esfuerzo el pistón comienza a decelerar e invertir la curva.

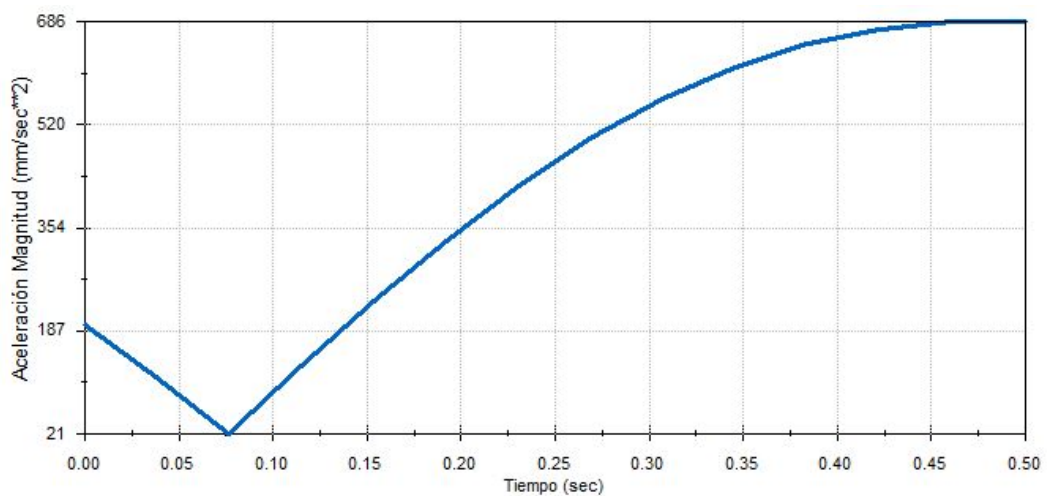


Figura 46: Gráfica resultante de la aceleración en el pistón

Como esta magnitud también depende del tiempo, obtenemos la curva característica con el mismo procedimiento que el anterior. Para conseguir un buen ajuste se ha tenido que recurrir a una ecuación polinómica de orden cuatro, con un coeficiente de regresión también muy cercano a la unidad.

$$\text{Aceleración (mm/s}^2\text{)} = -20870 \cdot t^3 + 15227 \cdot t^2 - 1392,7 \cdot t + 149,5$$

$$R^2 = 0,9719$$

Con estos datos se va a obtener la curva de la presión que ejerce el pistón al subir en el cilindro y así crear una depresión dentro de él y que pueda entrar el agua dentro de él. Primeramente con la fórmula de la segunda ley de Newton hallamos la fuerza aplicada. La masa usada es el peso del pistón y de la plomada.

$$F = m \cdot a$$

$$F = (0,985 \text{ kg} + 5,35 \text{ kg}) \cdot (-20870 \cdot t^3 + 15227 \cdot t^2 - 1392,7 \cdot t + 149,5) \cdot 10^{-3}$$

$$\text{m/s}^2 =$$

$$-132,1 \cdot t^3 + 96,38 \cdot t^2 - 8,81 \cdot t + 0,94 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 \text{ (N)}$$

Y con la expresión de la presión:

$$\text{Presión} = F / S_{\text{cilindro}}$$

$$P = -132,1 \cdot t^3 + 96,38 \cdot t^2 - 8,81 \cdot t + 0,94 \text{ N} / 2,827 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 =$$

$$-46727,98 \cdot t^3 + 34092,67 \cdot t^2 - 3116,37 \cdot t + 332,5 \text{ N/m}^2 \text{ (Pa)}$$

Con esta ecuación resultante, dependiente del tiempo la reproduciremos en una gráfica, figura 47. De esta manera se reparte de presión dentro del cilindro de una manera aproximada.

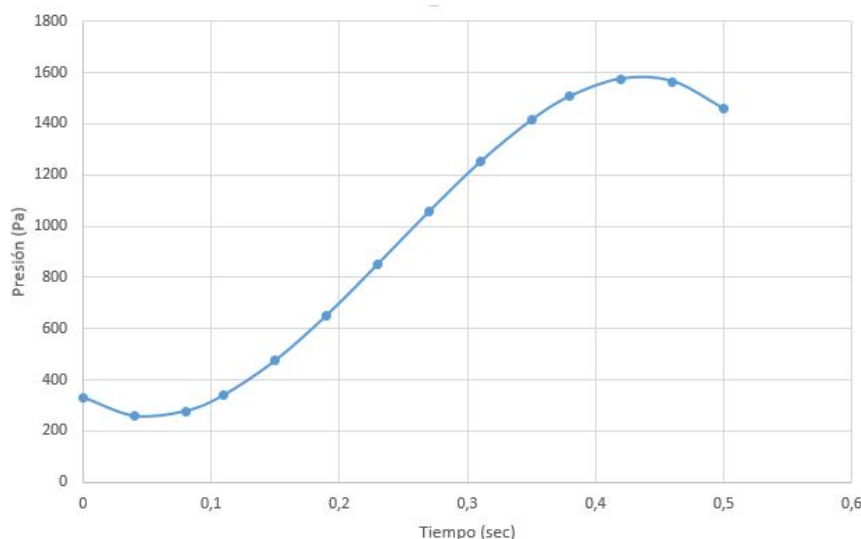


Figura 47: Gráfica reparto de presión dentro del cilindro (subida pistón)

7 FABRICACIÓN DE PIEZAS CON MPRESIÓN 3D

7.1 Introducción fabricación aditiva

La impresión en 3D consiste en la reproducción de objetos con volumen a partir de un prototipo diseñado por ordenador. En el presente apartado se describirá el desarrollo de las actividades de impresión en tres dimensiones del diseño de la máquina elaborada en *Autodesk Inventor*.

Esta forma de fabricación es una técnica que empezó a utilizarse hace más de diez años y en su futuro se especula con su utilización para la creación de puentes y edificios. A día de hoy se ha alcanzado el momento en que estas impresoras se han vuelto muy asequibles económicamente por su bajo coste de producción y materiales de inferior calidad. También son fáciles de manejar para la mayoría de personas que posean conocimientos técnicos básicos. Asimismo, estas impresoras tan asequibles son más cercanas a una visión de prototipo que a una versión final de un producto.

En la industria se encuentran diferentes y muy variadas técnicas de impresión 3D. Pero la que compete en este trabajo, y la más extendida es la técnica Fused Deposition Modeling (FDM); impresoras que fabrican objetos

tridimensionales mediante la superposición de capas de materiales como plásticos o resinas. Estos materiales se van uniendo formando pequeñas capas una encima de otra, intercaladas por una subida del extrusor, definido por la altura de capa (que influirá en gran medida en su calidad), dando un resultado final un objeto en tres dimensiones.

De tal manera, ya que el método de impresión que se va a utilizar consiste en FDM, se profundizará más en él y su proceso, pero antes hay que definir los parámetros previos, como ilustra la figura 48.

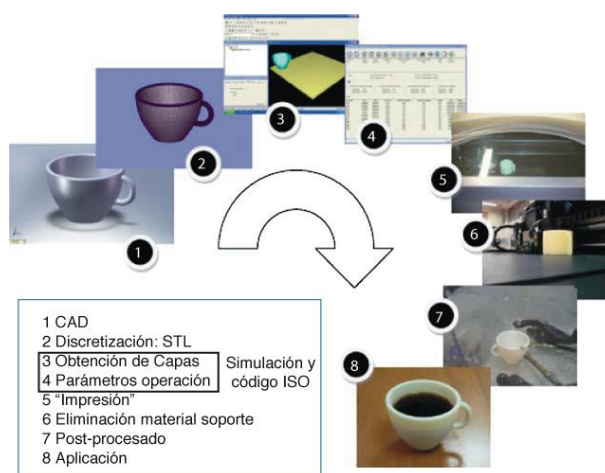


Figura 48: Etapas prototipado rápido (Gibson, 2010)

Con esta figura como esquema general, vemos que la realización anterior de este TFG se ha centrado en las etapas uno y dos, diseño CAD. Con los siguientes apartados se irán desgranando las distintas etapas hasta llegar al prototipo final.

7.2 Software y hardware

Para este apartado se comenzará hablando sobre el tipo de la impresora 3D, se trata del modelo *Witbox* de la marca *Bq*, con un tamaño de plataforma de impresión similar al DIN-A4 (210x297) y puede llegar a imprimir figuras de hasta veinte centímetros de altura. Esta máquina optimiza su funcionalidad de modo que se pueden imprimir varias figuras de una sola vez. Su entorno de impresión se encuentra totalmente recubierto por una estructura de plástico y ventanas de metacrilato para que se pueda apreciar el interior. Este armazón

es muy útil para mantener el calor, crear una atmosfera de impresión más adecuada, a la vez que evita que se introduzcan factores externos. También se agradece este tipo de recubrimientos aislantes porque evitan la inhalación de gases tóxicos que los plásticos expulsan al fundirse. Se puede ver esta carcasa en la figura 49.



Figura 49: Impresora 3D utilizada para el presente TFG

Se trata de una máquina de uso doméstico y sus calidades están comprometidas, en comparación con otras impresoras más costosas. Pero aun así es una excelente opción calidad-precio.

La compañía española *Bq* incorporó a esta máquina un sistema de impresión nunca visto, inspirado en la curva de Fibonacci, con un tubo PTFE para el paso del filamento, (Contreras, 2014). Este tubo se encuentra dentro del *heatcore ddg extruder* diseñado por la misma empresa, *Bq*. Este extrusor dispone de una gran fuerza de tracción, que permite la posibilidad de imprimir una gran diversidad de filamentos. La temperatura de impresión se alcanza rápidamente gracias a su calefactor cerámico de 40 W a 12V. Se puede ver este extrusor o nozzle en la figura 50.



Figura 50: Ejemplo de extrusor (www.eltucan.es)

Las desventajas que se han podido observar en esta máquina es que no dispone de cama caliente. Este es un dispositivo que, conectado a la fuente de alimentación de la impresora, logra que el cambio de temperatura que sufre el plástico fundido al tocar el cristal templado no sea tan brusco. De este modo se evitan problemas de *warping*. Además disminuiría las posibilidades de que la pieza acabe desprendiéndose por las fuerzas de deformación que el proceso de impresión por capa genera, proporcionando una buena adhesión al cristal.

Como último elemento a destacar es el filamento que se utilizará en todo el proceso de impresión, y se trata de plástico PLA + (ácido poliláctico), polímero termoplástico que a diferencia de otros materiales es fabricado a base de recursos renovables, como almidón de maíz, raíces de tapioca o caña de azúcar. El PLA normal y la versión plus, es considerado un pseudoplástico no newtoniano. La versión normal presenta resistencia al flujo, lo que significa que su viscosidad disminuye en relación a la tensión aplicada, esto puede producir en ocasiones atascamientos en el extrusor. Por esta razón se ha usado PLA +, que con unos aditivos distintos al PLA, mejora sustancialmente los atascamientos, aunque no los evita.

Este material será el elegido para llevar a cabo la impresión por su bajo coste y también por una característica importante, y es que no necesita una cama calefactada, aunque sí recomendable (Contreras, 2019). Se puede ver el filamento usado en la figura 51.



Figura 51: Filamento usado en la impresión

Las características principales de este material son las siguientes:

- Diámetro filamento: 1,75 mm
- Densidad: 1,24 g/cm³ (ASTM D792)
- Módulo elástico en flexión: 3600 MPa (ISO 178)
- Resistencia a la flexión: 108 MPa (ISO 178)
- Dureza: 85 Sh D (ASTM D2240)
- Temperatura recomendada de impresión: 200/220 °C
- Temperatura de flexión bajo carga: 56 °C (ISO 75/2B)
- Temperatura de transición vítrea: 56/64 °C (ASTM D34 18)

Todo ello unido a un endurecimiento rápido, con una mínima deformación, tolerancia de $\pm 0,02$ mm, al igual que una mínima tensión térmica.

La impresora *Bq Witbox* puede ser dirigida por varios software, pero el elegido para este proyecto es el *CURA 3.6*, por su simplicidad y manejo intuitivo. Este programa tiene una licencia libre y es desarrollado por *Ultimaker B.V.* De forma complementaria cabe destacar que es el software más utilizado del mercado y posee un potente motor de corte. Su interfaz, en la figura 52, muestra el entorno de trabajo en el que nos moveremos.

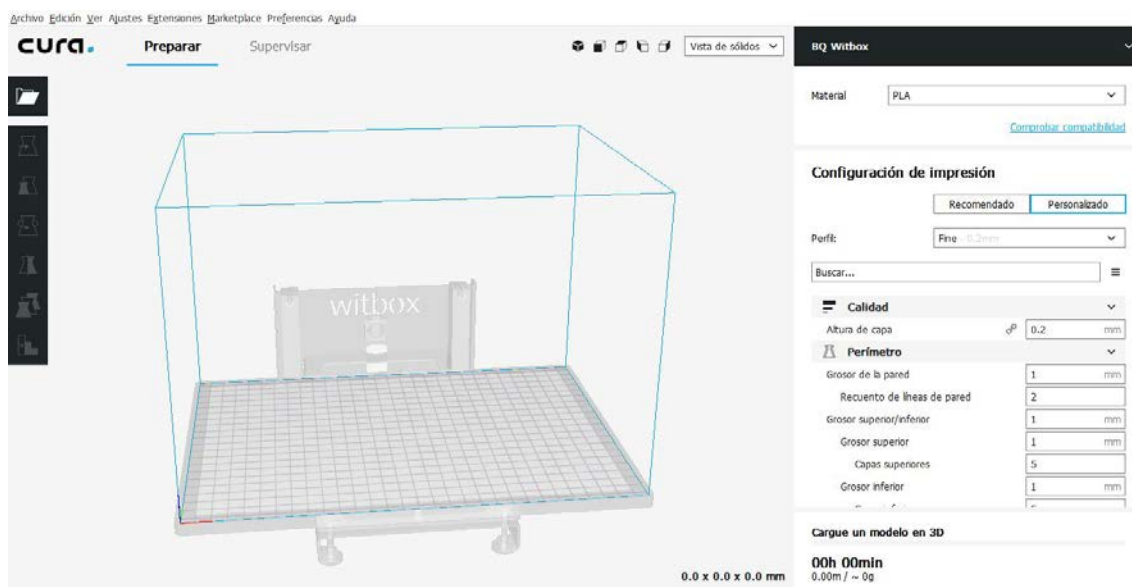


Figura 52: Entorno CURA 3.6

Podemos ver que aunque el programa esté optimizado por otra compañía, podemos elegir el entorno de impresión de nuestra impresora, *Witbox*.

7.3 Proceso de impresión

El enlace de conexión entre el diseño CAD y el software *Ultimaker CURA* 3.6, es la extensión STL, que deberemos exportar a este formato para que el programa pueda entender las instrucciones que se le exige.

Ya que se ha intentado modelar el tamaño real de la máquina sólo con las dos únicas medidas que Taqī ad-Dīn aportó sobre su máquina, mencionadas anteriormente, nos damos cuenta que no es posible imprimir la máquina a escala real. Según el entorno de la impresora la escala más cómoda para imprimir la máquina a una escala 1:6. Esta escala se estima consultando la medida más extensa de la bomba, resulta ser el eje de levas, con una longitud de mil setecientos milímetros, y adaptarlas del mismo modo al contorno más amplio de la impresora, cuatrocientos veinte milímetros. El cálculo ha sido el siguiente:

$$1700 \text{ mm} / 297 \text{ mm} = 5,72$$

Pero dado que los detalles de la máquina no serán apreciados con esta escala, se decide que la escala a representar será la 1:4, pese a que no está

normalizada (la siguiente normalizada es 1:10), y así tener una visión más perceptible. Lo que supondrá imprimir las piezas en varias partes. Esto tiene el inconveniente de rediseñar las piezas más grandes para incorporarles una especie de macho y hembra para que su resistencia no quede del todo afectada en ese punto de unión.

Ya que el software CURA reconoce los perímetros del espacio de impresión de la impresora no será necesario ajustarlos. En un primer paso se carga la pieza en el entorno virtual de la impresora e introducimos la escala predefinida, después ajustamos la pieza al perímetro, como vemos en la figura 53.

En este caso se trata de dos piezas, para aligerar el tiempo de impresión, vemos que en una de ellas ha sido necesario realizar un plano de corte para que en su impresión se minimicen los posibles defectos. Posteriormente serán unidas por algún adhesivo plástico. También podemos observar que se ha elegido el perfil “*extra fine 0.06 mm*” y elegido el material PLA. Continuaremos modificando los parámetros que se encuentran a la derecha de la figura 53.

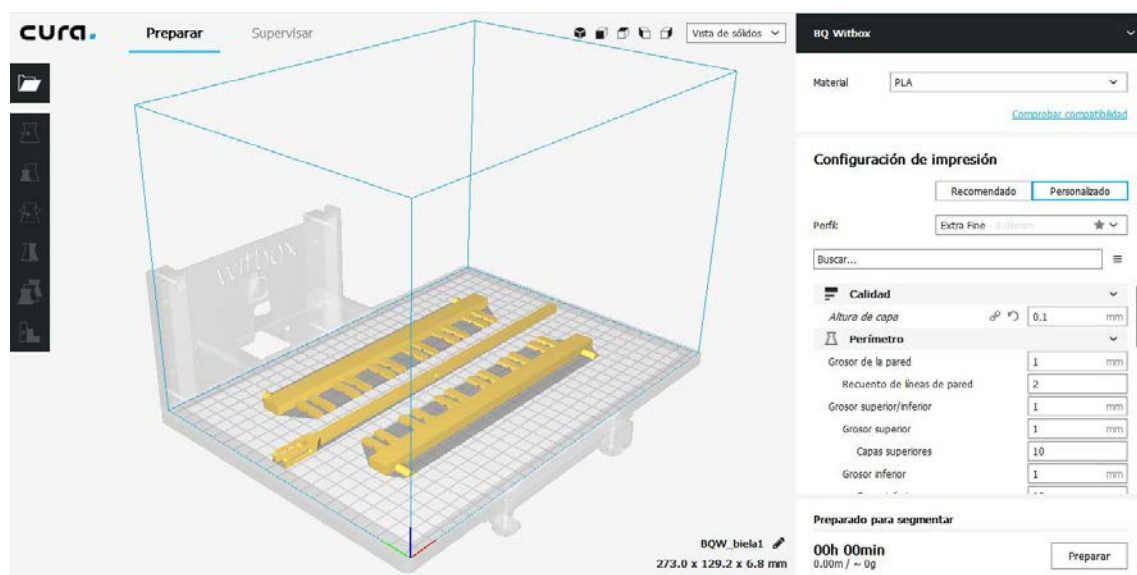


Figura 53: Ajuste de dimensiones de piezas

En lo que concierne a la calidad de la pieza, la altura de capa es un parámetro importante a tener en cuenta, ya que se definirá la distancia que el eje z se elevará al extrudir cada capa, distinguiendo así la compresión física entre ellas. La apariencia exterior se compromete en gran medida con este factor, sobre todo si se trata de superficies circulares. El siguiente parámetro que se modificará es el de altura de capa inicial, esta medida hace referencia a la capa primera de impresión, con el fin de obtener una mayor adherencia al cristal templado, cuanto menor sea este valor mejor acabado poseerá, pero teniendo en cuenta la altura mínima deseada ya que el plástico que funde el extrusor necesita su desahogo. Se pueden ver los parámetros elegidos en la figura 54.

Calidad			
Altura de capa		0.15	mm
Altura de capa inicial		0.2	mm
Ancho de línea		0.4	mm
Ancho de línea de pared		0.4	mm
Ancho de línea de la pared exterior		0.4	mm
Ancho de línea d...d(es) interna(s)		0.4	mm
Ancho de línea superior/inferior		0.4	mm
Ancho de línea de relleno		0.4	mm
Ancho de línea de la capa inicial		100.0	%

Figura 54: Parámetros de calidad elegidos

Que la pieza no sea maciza ahorra mucho tiempo de impresión, y esto se modifica en el apartado perímetro. En este se podrá modificar, como bien dice su nombre, el perímetro de la pieza, sus caras superior / inferior, el grosor de pared, entre otros. De él dependerá la robustez de la pieza. El interior que quedaría sin definir, ya que el software es capaz de optimizarlo automáticamente. Se pueden ver los parámetros elegidos en la figura 55.

Relleno	
Densidad de relleno	20 %
Distancia de línea de relleno	6.0 mm
Patrón de relleno	Trihexagonal
Multiplicador de línea de relleno	1
Porcentaje de superposición del relleno	10 %
Grosor de la capa de relleno	0.15 mm
Pasos de relleno necesarios	0

Figura 55: Parámetros de perímetro elegidos

Después de modificar estas variables, el apartado relleno viene ligado al último visto. Como antes se ha mencionado las piezas impresas en plástico PLA + no suelen ser macizas porque su requerimiento mecánico no es demasiado alto, dado su tinte de prototipado rápido. Existen muchos tipos de estructuras de relleno, desde el panel de abeja, rejilla, etc. Pero nos decantaremos por el patrón de relleno trihexagonal, por su aporte a la resistencia en las paredes, y muy utilizado en piezas prolongadas, como son la mayoría en la bomba de seis cilindros. En la figura 56 se pueden observar las variables seleccionadas.

Perímetro	
Grosor de la pared	1 mm
Recuento de líneas de pared	2
Grosor superior/inferior	1 mm
Grosor superior	1 mm
Capas superiores	10
Grosor inferior	1 mm
Capas inferiores	10

Figura 56: Parámetros de relleno elegidos

El próximo ajuste que se hará será lo correspondiente al material. Una vez definido el tipo de material, se deberán ajustar las temperaturas para un óptimo uso, siempre acogiendo las recomendaciones del fabricante. La temperatura más adecuada para trabajar con plástico PLA + oscila entre los 198 – 220 °C. Tras varias pruebas se observa que la adhesión necesaria entre

capas debe ser mayor, de modo que se prefiere una temperatura más cercana a los 210°C. Como la impresora dispone de una cama fría no habría más parámetros que modificar, los cuales podemos ver en la figura 57.

Velocidad		
Velocidad de impresión	40	mm/s
Velocidad de relleno	40	mm/s
Velocidad de pared	20.0	mm/s
Velocidad de pared exterior	20.0	mm/s
Velocidad de pared interior	40.0	mm/s
Velocidad superior/inferior	10	mm/s
Velocidad de soporte	40	mm/s
Velocidad de desplazamiento	120	mm/s

Figura 57: Parámetros de material elegidos

Siguiendo con los requerimientos de impresión se encuentra el apartado relativo a la velocidad. Dentro de esta sección radican muchos de los fallos de impresión, esto se debe a que una velocidad demasiado alta puede provocar que la pieza llegue a despegarse, incluso, de la cama fría. Por ello, y después de pruebas al respecto, se decide que la velocidad de impresión óptima será de 40 mm/s, aun sabiendo el coste de tiempo que ello implica. Se toma esta decisión porque se observa que en algunas piezas hay escalones entre capas, y se deduce que debido a una velocidad excesiva, tanto de capa superficial o de relleno, ha podido provocar este fallo. En la figura 58 podemos observar los parámetros elegidos.

Material		
Temperatura de impresión	210	°C
Temperatura de impr... de la capa inicial	210	°C
Temperatura de impresión inicial	205	°C
Temperatura de impresión final	210	°C
Habilitar la retracción	☒	
Retracción en el cambio de capa	☐	
Distancia de retracción	4	mm
Velocidad de retracción	25	mm/s

Figura 58: Parámetros de velocidad elegidos

En algunas geometrías de las piezas que se van a imprimir tienen formas en voladizo, quiere decir que a la hora de la impresión se realizarían en el “aire”. Por eso el siguiente apartado es importante para acabar con ese problema, y es la opción de soporte, como vemos en la figura 59. Una densidad elevada de soporte, entorno al 20%, obtendrá unos acabados considerables. Sin embargo, se debe tener en cuenta las dimensiones de la pieza ya que siendo ese porcentaje para una pieza de pequeñas dimensiones será muy difícil de extraer posteriormente, se consideran estructuras sacrificables. En efecto, lo más habitual es que la pieza acabe siendo dañada debido a que este material sobrante se retira de forma manual o con la ayuda de un cúter. En lo que compete a la impresión de nuestras piezas, de casi el máximo tamaño de la cama de la impresora, no será necesario bajar el porcentaje de volumen de soporte, y dado que algunas piezas son cilíndricas esta opción será de ayuda. En este caso, se ha elegido un patrón triangular, que asegura que la pieza, en caso de necesitar soporte, no tenga ningún error de caída del soporte o similar, se trata de una configuración de soporte muy estable y resistente. También habilitaremos la interfaz de soporte, que creará una superficie plana, en la que poder imprimir el elemento que estaría en el aire.

Soporte	
Generar soporte	☒
Colocación del soporte	En todos sitios
Ángulo de voladizo del soporte	50°
Patrón del soporte	Triángulos
Densidad del soporte	20%
Expansión horizontal del soporte	0.2 mm
Grosor de la capa de relleno de soporte	0.15 mm
Escalones de relleno de soporte	0

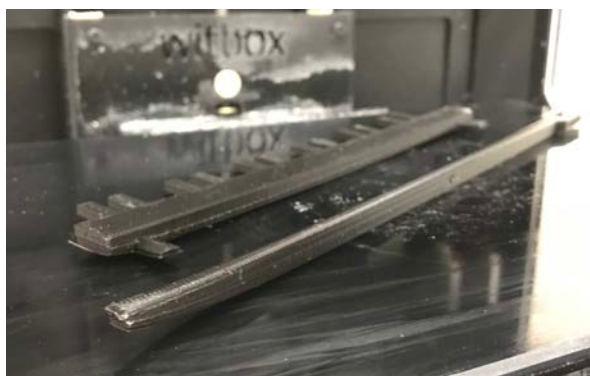
Figura 59: Parámetros de soporte elegidos

Una vez configuradas todas las variables trasladamos los datos a formato *gcode*, el lenguaje de control numérico que comprende la impresora 3D. Este consiste en un fichero de texto plano que contiene instrucciones sencillas que indican a la máquina que tiene que realizar, como movimientos en los ejes X, Y y Z, datos de temperatura máxima, etc.

Terminado este proceso de exportación de datos, se ajusta la impresora. Una de las incógnitas a tener en cuenta es la alineación de la cama con la boquilla del extrusor. La impresora *Bq Witbox*, tiene una opción que nos permite realizar fácilmente esta operación colocando la boquilla en cuatro puntos de la cama para que el usuario pueda ajustarla con tres tornillos que se encuentran debajo de la cama de cristal templado. Una vez realizado este calibrado, es importante comprobar que el extrusor tiene bien acoplado el filamento en él. Se puede comprobar con las funciones de cambiar filamento, en el que el extrusor se calienta y consume una pequeña parte de filamento, si tiene un buen flujo se sabrá que está bien.

Una vez realizado el calibrado a la impresora, aplicamos un adhesivo a la cama de cristal templado en forma de spray, normalmente laca de la marca Nelly. Este adhesivo será suficiente para que la primera capa de sujeción quede bien sellada a la cama. El siguiente paso será cargar el archivo *gcode* en la impresora y el extrusor empezará a calentarse hasta llegar a la temperatura requerida. Cuando esa temperatura se estabilice la máquina comenzará a imprimir la pieza.

En los primeros ensayos podemos ver en la figura 60 a), los fallos derivados del warping, se puede deducir que por una excesiva velocidad de impresión o una aplicación escasa de adhesivo a la placa. En la figura 60 b), con PLA normal, se puede observar fallos por obstrucción en el extrusor, lo que provocó un flujo irregular y una resistencia pésima



a)



b)

Figura 60: Fallos de impresión encontrados

8 MONTAJE

En este apartado se comentaran algunos aspectos destacables sobre el montaje de esta máquina. Ya que la escala elegida es muy interesante desde el aspecto visual, a la hora de llevarlo a las dimensiones, máximas, de modelado de la impresora 3D se han tenido que realizar cortes en las piezas para conseguir la escala deseada. Este procedimiento ha sido realizado a través del software *Netfabb 4.4.0*, programa, al igual que *CURA*, de fabricación aditiva. La unión de estos cortes se ha ejecutado de dos maneras diferentes:

Uso de uniones macho-hembra: para ello se han modificado el diseño original de algunas piezas para insertarle un saliente que encajara con la pieza anexa. En la siguiente figura 61 se muestra un ejemplo de la rueda de paletas (en formato STL), en la figura a), se muestra el eje con doce protuberancias y en la figura b) se observa como en el extremo de la cuchara tiene el alojamiento.

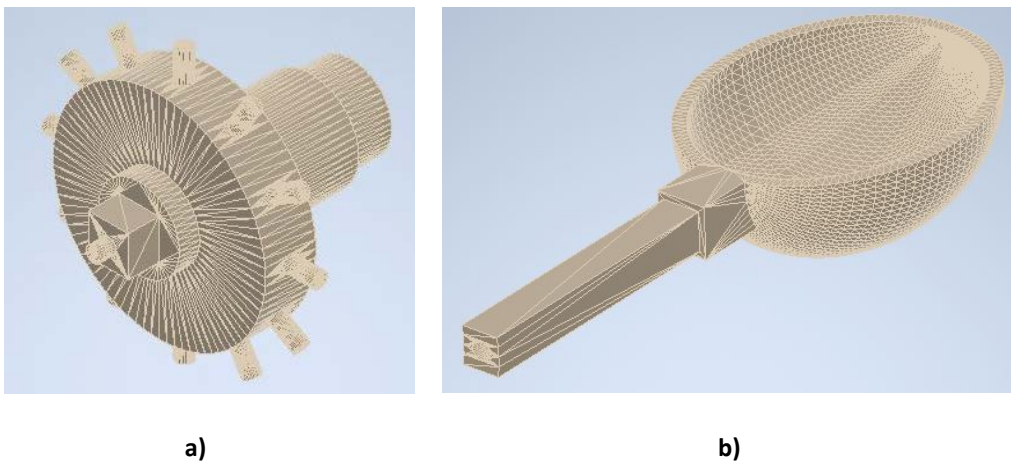


Figura 61: Ejemplo unión macho hembra

Uso de un adhesivo: en este caso se ha recurrido a la soldadura plástica epoxi, unión de dos compuestos plásticos que al paso de un corto periodo de tiempo adquiere una resistencia y capacidad adherente notable.

Combinación de ambos: En esta máquina el ejemplo más relevante es el de la red de tuberías, las paredes con demasiado delgadas para insertar salientes y la opción del adhesivo queda cuestionada al tener que soportar esa

unión mucho peso. Por eso se ha ideado una solución para esta cuestión insertando camisas de aluminio en las uniones de las tuberías. De esta manera se da a la unión estabilidad y junto al adhesivo obtiene la fuerza necesaria para que ese punto deje de ser una zona débil. En la figura 62, se puede observar el procedimiento.



Figura 62: Unión red de tuberías

Finalmente, la *“Bomba de Elevación de Agua de Seis Cilindros”* de Taqī ad-Dīn podemos verla completamente ensamblada en la figura 63, se puede observar que las últimas tres paletas no están colocadas porque, como ya se comentó a lo largo de este proyecto, están diseñadas para introducirse en la fuente de agua en movimiento



Figura 63: Ensamblaje de la bomba de seis cilindros de Taqī ad-Dīn

9 CONCLUSIONES

Para finalizar la exposición de la memoria de este proyecto, se han llegado a las siguientes conclusiones:

Primera: La evidencia que se mostró anteriormente demuestra el cumplimiento de los objetivos propuestos al inicio de este proyecto, tanto expositivo como formativo.

Segunda: La importancia de la reconstrucción histórica y la disciplina pedagógica que esta conlleva. Resultando menos complejo desarrollar nuevos conceptos.

Tercera: Conocimientos del software CURA. En la elaboración de este proyecto TFG se ha aprendido acerca de parámetros de impresión óptima, así como modificar el código de control numérico del programa. En paralelo, se destaca los conocimientos mecánicos aprendidos en la resolución de problemas con la impresora 3D.

Cuarta: El filamento PLA es un material que provoca taponamientos en el extrusor, por ello si se quiere utilizar este material para periodos de impresión grandes se recomienda el PLA+.

Quinta: Con los materiales propuestos por Taqī ad-Dīn para la fabricación de esta máquina hace pensar que, si se llegara a construir, no duraría demasiado debido a las degradaciones de los materiales con la humedad del agua. Dadas sus dimensiones su caudal por segundo es grande, pero debido a la época preservar la estanqueidad del sistema no sería tan eficaz, y la máquina perdería poder de bombeo. Pero no se puede negar la genialidad del artefacto para su época.

Última: Las pocas dimensiones aportadas por el inventor, ha supuesto un reto a la hora de diseñar y calcular esta máquina. Por ello los resultados obtenidos son exclusivos para esta interpretación de la *“Bomba de Elevación de Agua de Seis Cilindros”* de Taqī ad-Dīn.

10 BIBLIOGRAFÍA

Ahmad Fu'âd Bâsha, At-Turâz Al 'Ilmi Al Islâmi, *El patrimonio científico islámico* p. 39.
Sitio web (consultado agosto 2020): <https://en.islamstory.com/es/artical/23619>

Al-Hassani, S. & Al-Lawati, M. (2009). *The Six-Cylinder Water Pump of Taqī ad-Dīn: Its Mathematics, Operation and Virtual Design*. Siglo XVI D.C., de FSTC Ltd and managed by the Foundation for Science, Technology and Civilisation, UK (FSTCUK) Sitio web:
<https://muslimheritage.com/six-cylinder-water-pump-taqi-din/>

Álvarez, J. (2016). *Banu Musa: los tres hermanos persas que ideaban autómatas en el siglo IX Autor de la entrada*. Siglo IX d.C., de La Brújula Verde / Licencia Creative Commons 4.0
Sitio web: <https://www.labrujulaverde.com/2016/06/banu-musa-los-tres-hermanos-persas-que-ideaban-automatas-en-el-siglo-ix#>

Bautista, E. et al., (2007). *Breve Historia Ilustrada de las Máquinas*. Madrid: Foundation of the Valencian International University.

Bonilla, A. (2003). *Herramientas de diseño e ingeniería*. Bizkaia.eus, Capítulo 1, 2-11. De Robotiker. Base de datos.

Chambers, W. & Chambers, R. (1881). *Encyclopaedia - A Dictionary of Universal Knowledge for the People* (Philadelphia, PA: J. B. Lippincott & Co., 1881)

Contreras, L. (2014). Bq Witbox, de imprimalia3d. Sitio web:
<http://imprimalia3d.com/services/bq-witbox>

Contreras, L. (2019). *Guía completa: el filamento PLA en la impresión 3D*, de 3dnatives
Sitio web: <https://www.3dnatives.com/es/guia-filamento-pla-en-la-impresion-3d-190820192/>

Creús, A. (2011). *Neumática e Hidráulica*. México: Alfaomega.

Daiyoub, A. (2018) *¿Qué crees que sabes sobre los bosques en Siria?*, de Forest Monitor
Sitio web: <https://www.forest-monitor.com/es/que-crees-que-sabes-sobre-los-bosques-en-siria/>

El-Sergany, R. (2012). *La Mecánica en la Civilización Islámica*, de www.islamhistory.com
Sitio web: <https://www.islamstory.com/es/artical/23619>

Gibson, I. et al., (2010). *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. Springer.

González I. (2008). *Ars Mechanicae, Ingeniería Medieval en España*. Ministerio de Fomento.

Hassaan, G. A. (2014). *Innovation of Mechanical Machinery in Medieval Centuries, Part IV: Mechanisms, Gear Trains and Cranes*. Cairo University, Giza, EGYPT: International Journal of Advanced Research in Computer Science & Technology (IJARCST 2014).

Hassan, A. (1977) *Taqī ad-Dīn and Arabic Mechanical Engineering, with the Sublime Methods of Spiritual Machines*. In Arabic (Institute for the History of Arabic Science, University of Aleppo, Syria, 1977). P. 165.

Hassani, A. M. (1979). *Arab Scientists Revisited: Ibn Ash-Shatir and Taqī Ed-Din*. Victorian Studies Centre, Leicester University, 1, p.139.

Hill, D. (1998), *“Studies in medieval Islamic technology from Philo to Al-Jazari”*, Edited by D. King, Aldershot, Eng/Brookfield, Ashgate.

Ihsanoglu, E. et al., (2006). *The History of the literature of natural and applied sciences during the Ottoman Period*, Istanbul: IRCICA, 2006, I, 42-44.

Malpica A. & Trillo, C. (2002) *La hidráulica rural nazarí: análisis de una agricultura irrigada de origen andalusí En: Asentamientos rurales y territorio en el Mediterráneo medieval*. Granada: Athos-Pergamos, 2002, pp. 221-261

Mastoner. *Filamento PLA 1,75 mm*, (n.d.)
<https://www.mastoner.com/images/pdfs/filamento-pla-bq-ficha-tecnica.pdf>

Norton, R. (2013). *Diseño de Maquinaria*. Pearson.

Palazzesi, A. (2007). *Al-Jazari, el robotista de la edad media*. Siglo XII d.C., de NeoTeo
 Sitio web: <https://www.neoteo.com/al-jazari-el-robotista-de-la-edad-media/>

Prieto, E. (2008). *Breve historia de la metrología, de Centro Español de Metrología* Sitio web:

https://www.cem.es/sites/default/files/files/breve%20historia_de%20la%20metrologia_doc.pdf

Prieto, E. (2018). *Cinemática computacional basada en ecuaciones de grupo para sistemas multicuerpo planos con singularidades de tipo geométrico y cinemático*. Universidad Politécnica Cartagena: Trabajo Fin Grado.

PrototiCad3D. (2016). *Diferencias entre Autodesk Inventor y SolidWorks*. Agosto, 2020, de PrototiCad3D Sitio web: <https://www.prototcad3d.com/2016/10/diferencias-entre-autodesk-inventor-y-solidworks.html>

Rodríguez, H. (2018). *Sistemas Hidráulicos de Transmisión de Potencia, de ingemecánica* Sitio web: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn212.html>

Roldán J. (2016). Molinos, norias y batanes en la península ibérica durante la edad media. Boletín de la Real Academia de Córdoba., BRAC, 165 (2016).

Samsó, J. (1992). *Las ciencias de los antiguos en al-Ándalus*. Madrid: Mapfre.

Sierra, C. (2011). *Mecánica Andalusí: Otra faz de nuestra historia secreta*. Revista Universidad Antioquia, 1, p. 40 - 49.

Zamora, B. Viedma, A. (2016). *Máquinas hidráulicas: teoría y problemas*. Cartagena: Universidad Politécnica, CRAI. Biblioteca. p. 22.

11 ANEXOS

11.1 Planos

Plano 1: Composición general de la bomba, (desglose de componentes)

Plano 2: Medidas:

- Eje de levas
- Bloque madera sujeción eje de levas
- Bloque piedra sujeción eje de levas

Plano 3: Medidas:

- Rueda de paletas

Plano 4: Medidas:

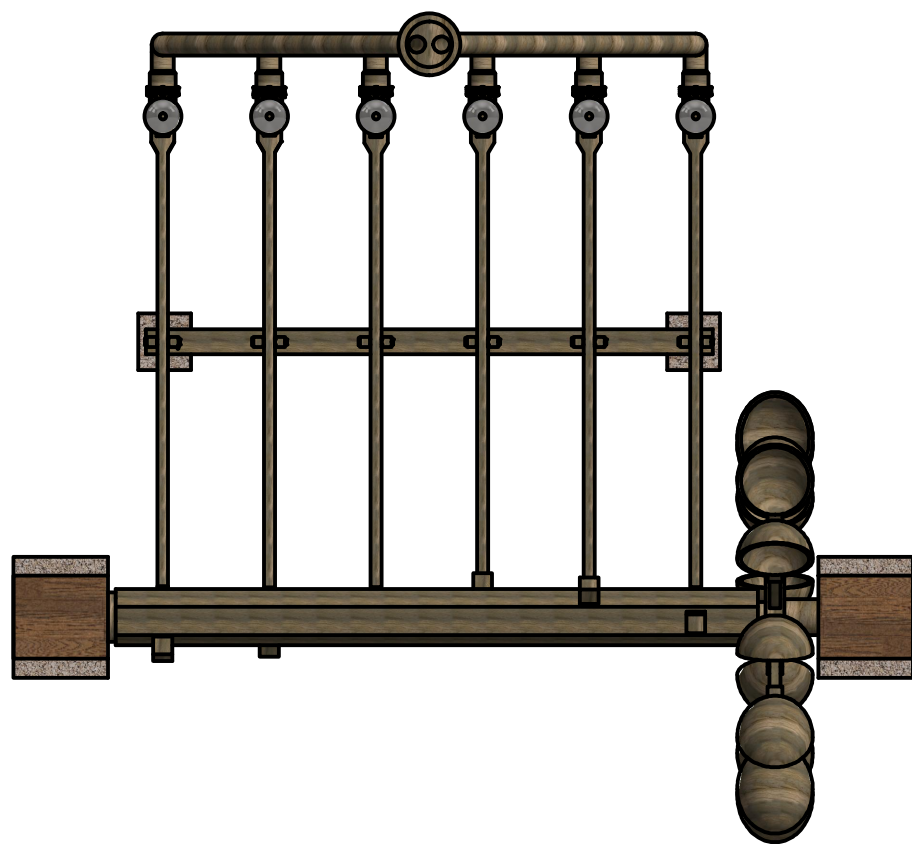
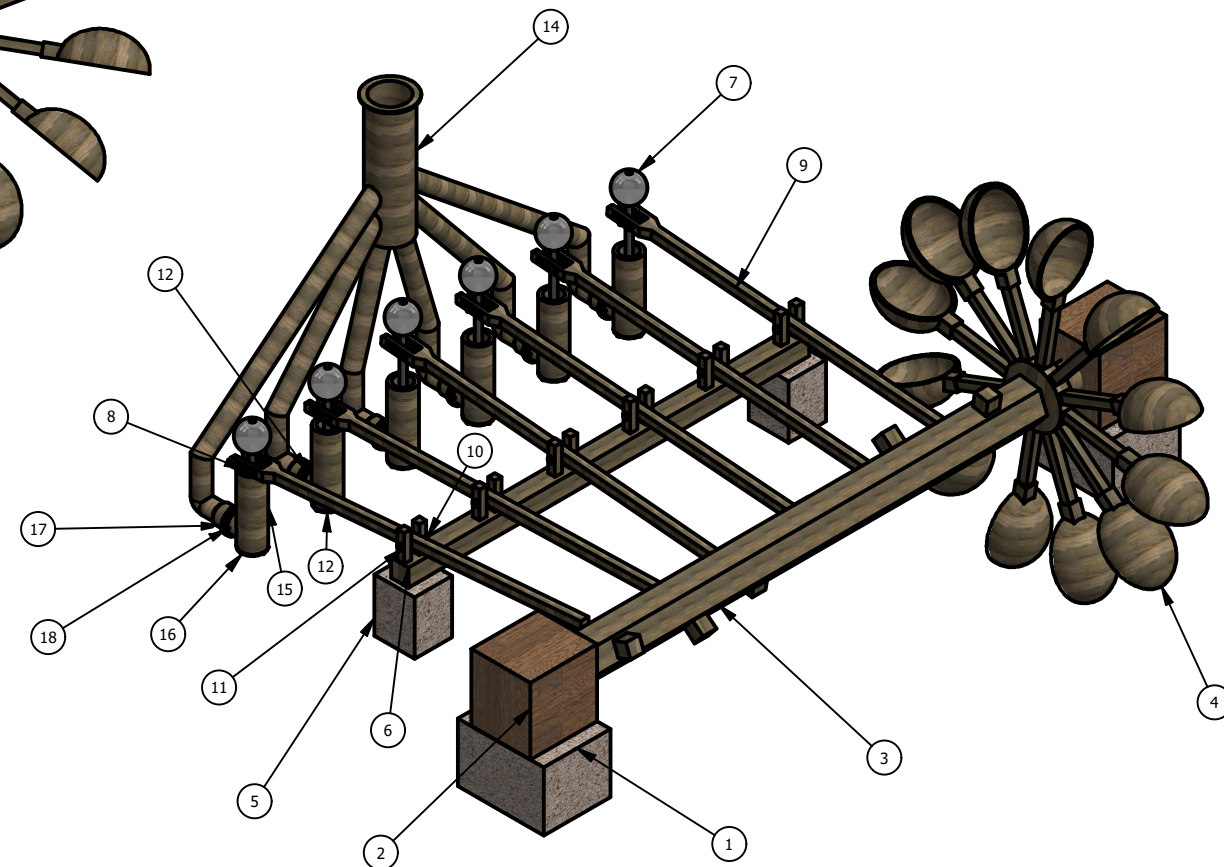
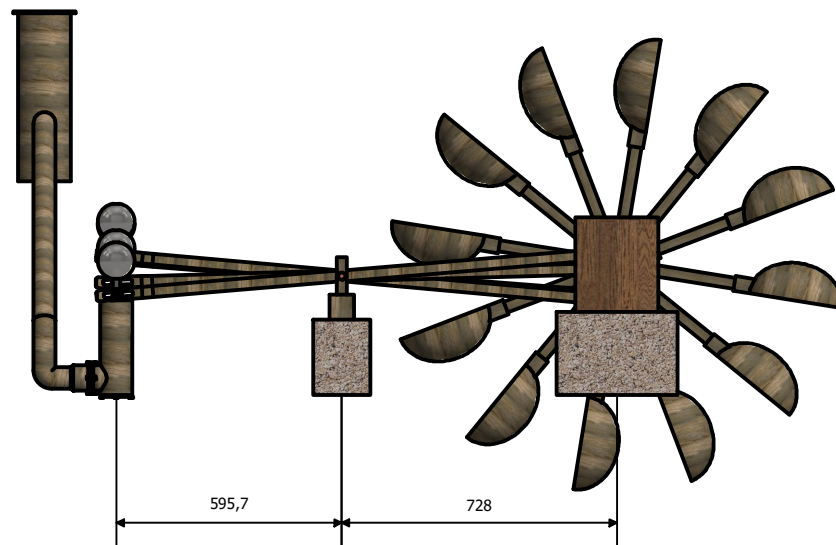
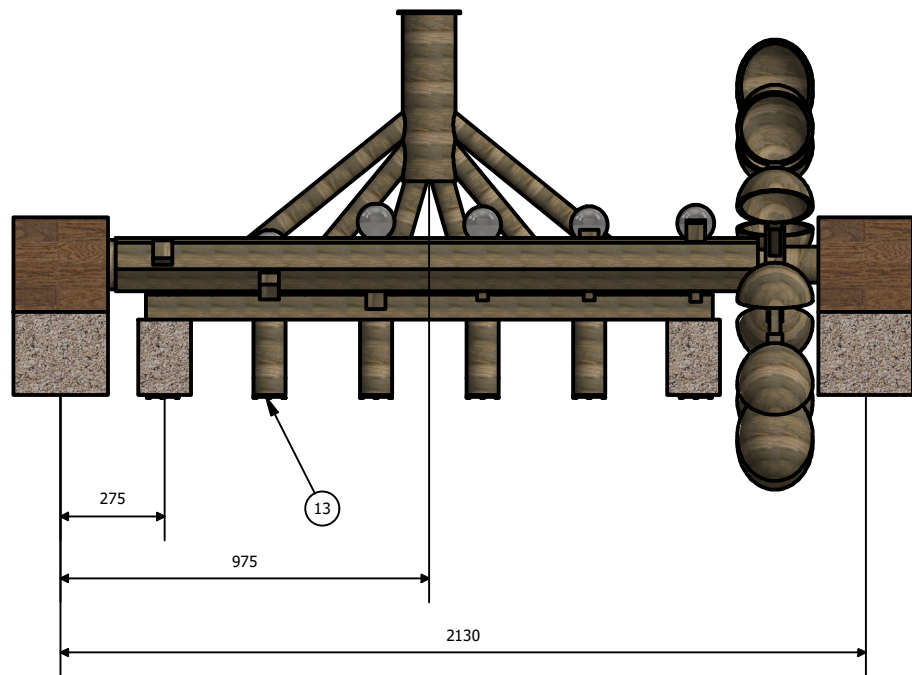
- Pivote balancines
- Balancines
- Perno conexión pistón – balancín
- Horquilla sujeción
- Perno sujeción pivote – balancín

Plano 5: Medidas:

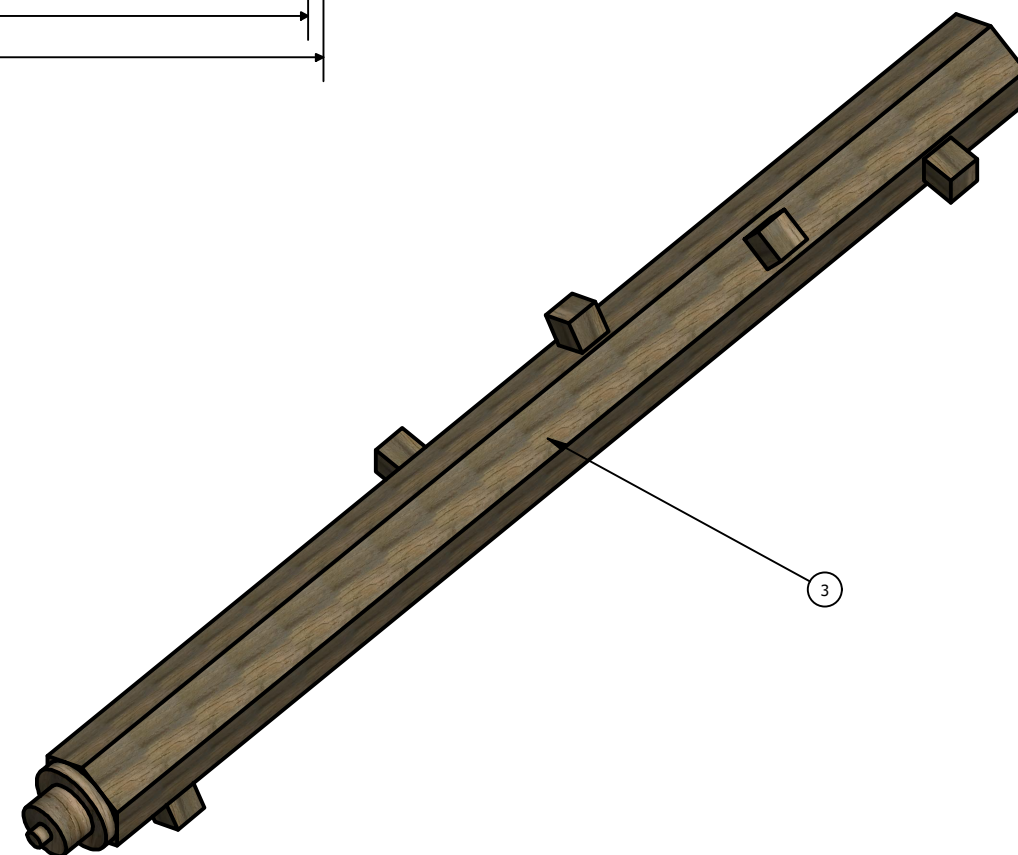
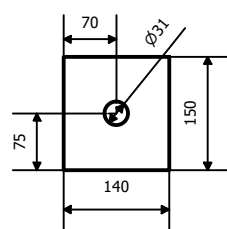
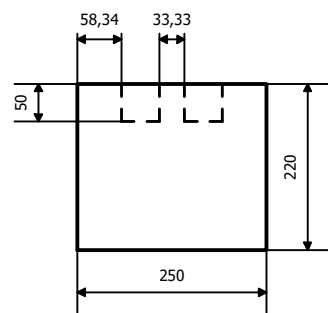
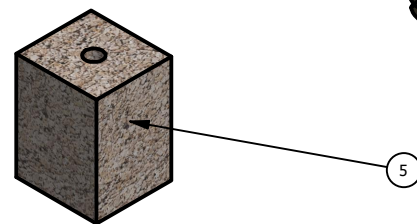
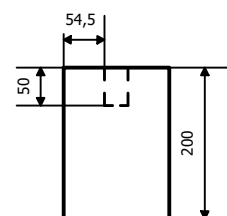
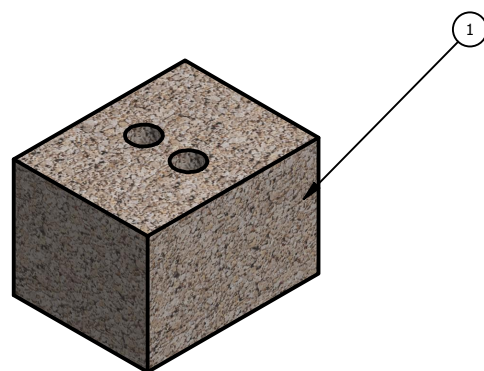
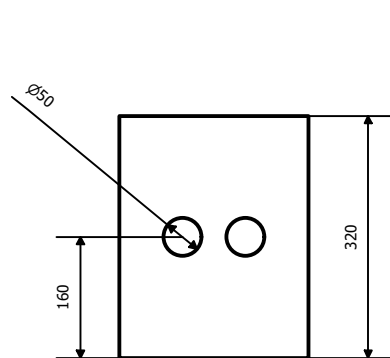
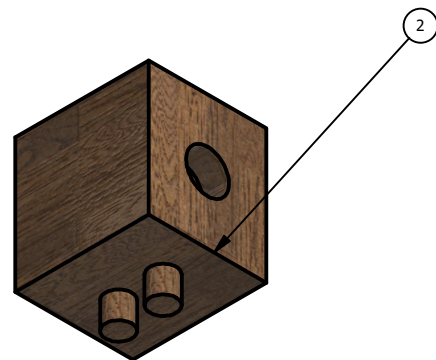
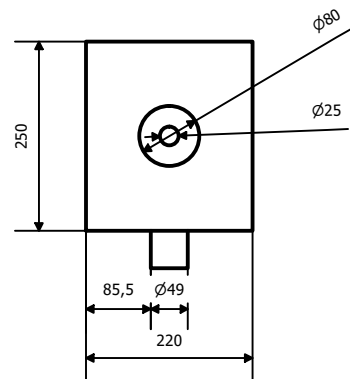
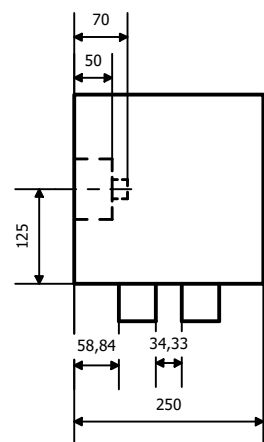
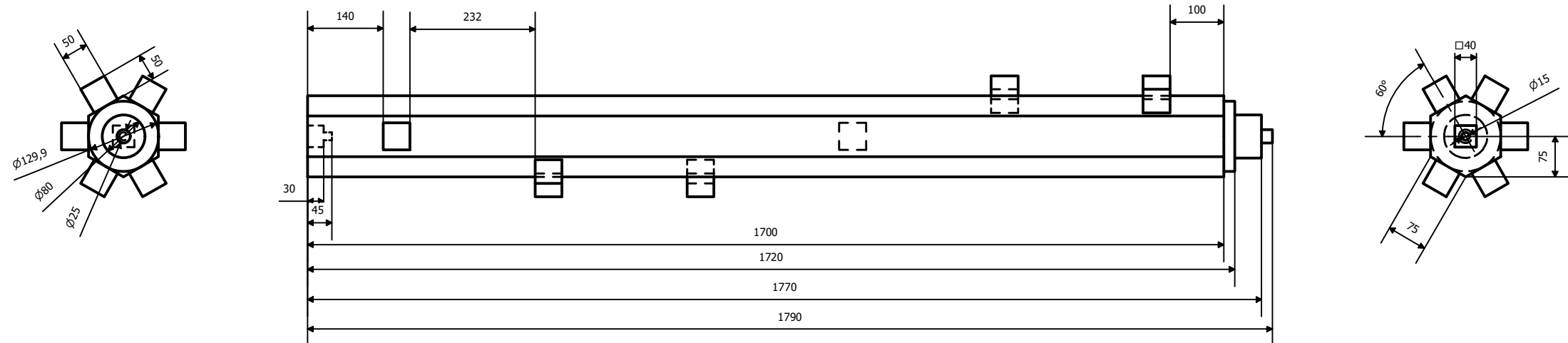
- Tubería central

Plano 6: Medidas:

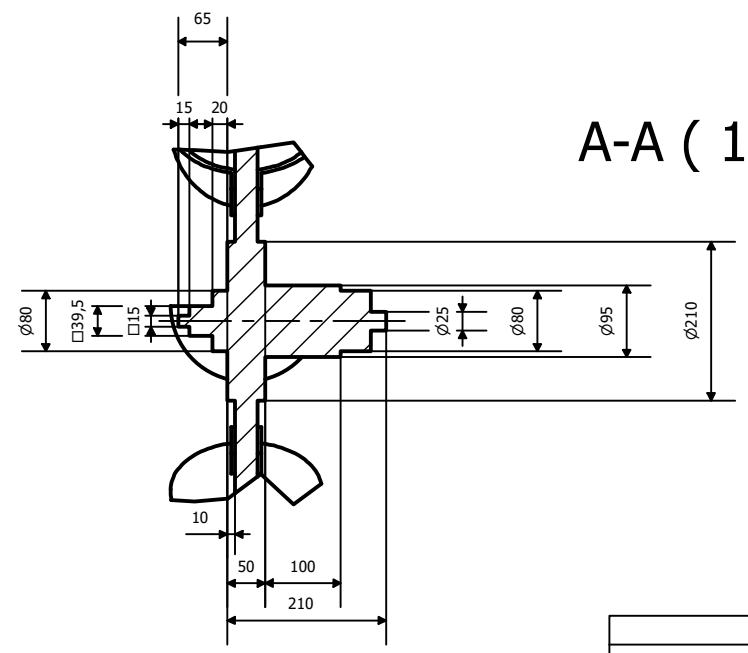
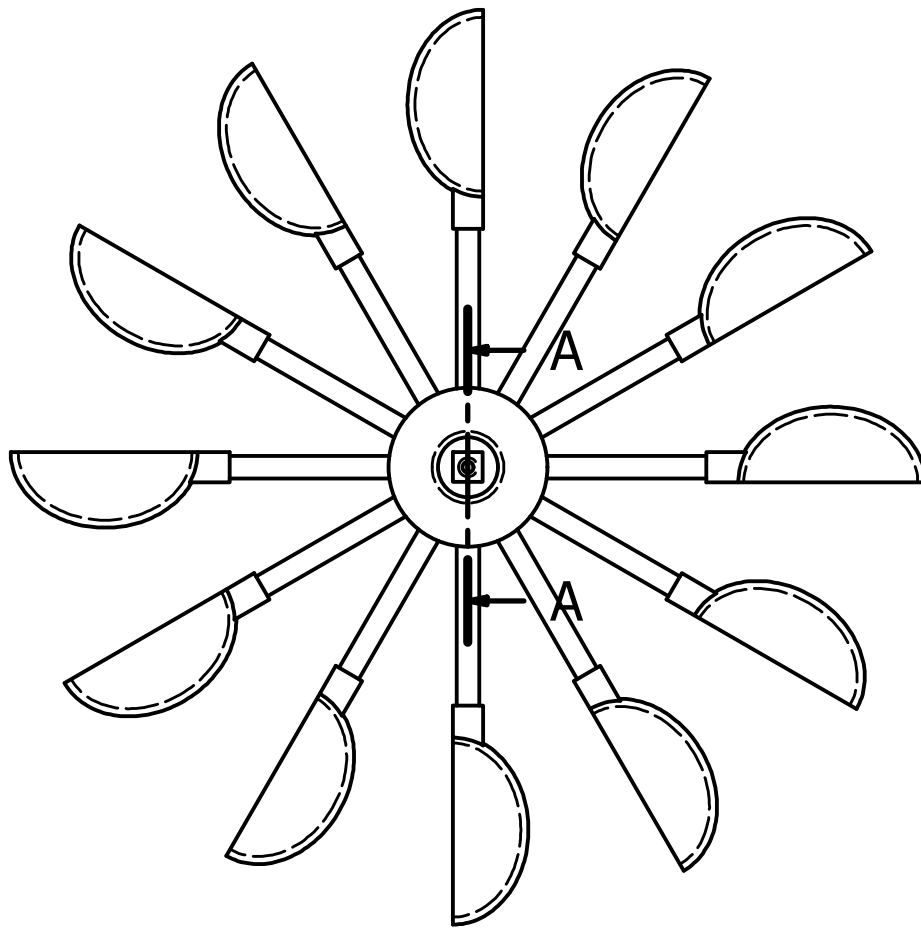
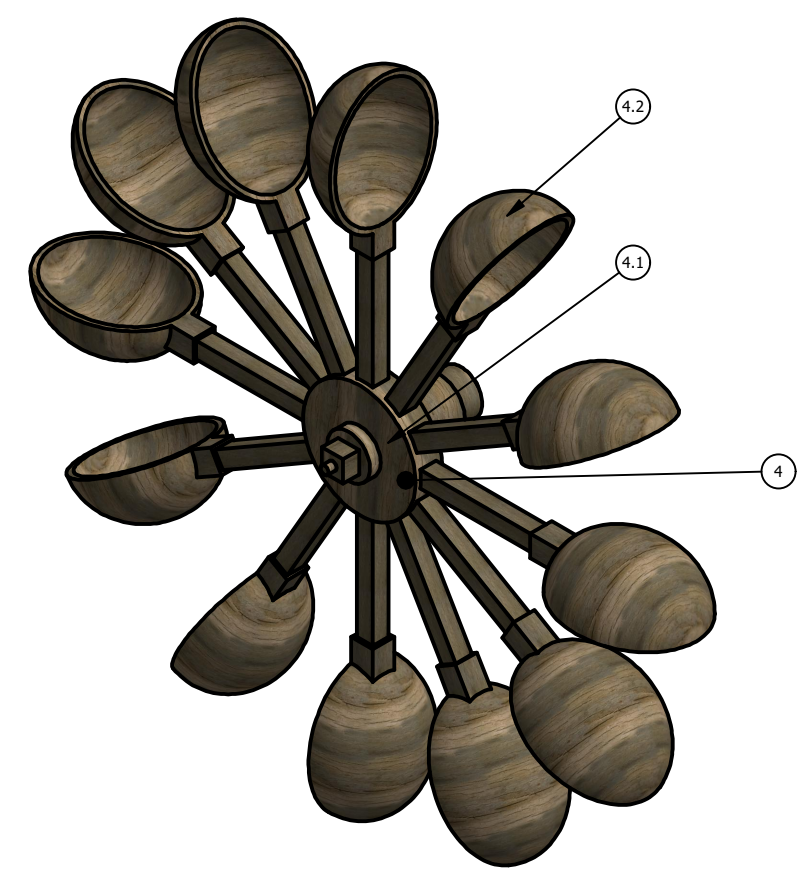
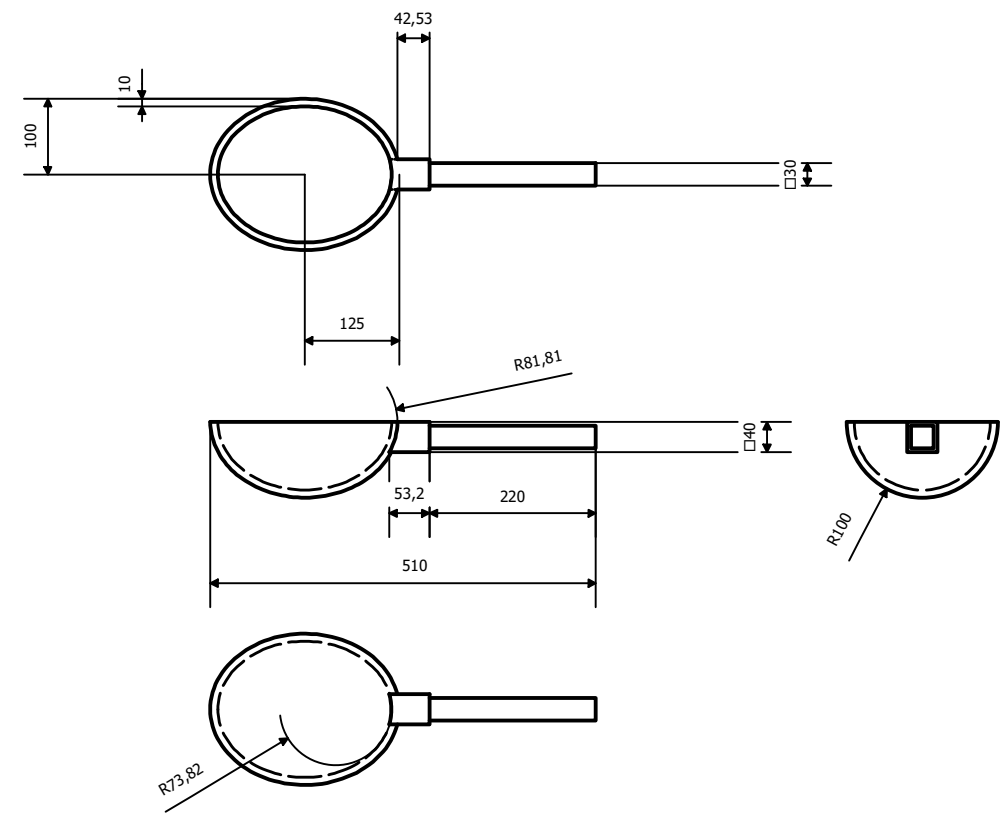
- Pistón
- Válvula clac
- Cilindro
- Tornillería



LISTA DE PIEZAS				
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	
1	2	BLOQUE_EJE	BLOQUE PIEDRA SUJECCIÓN EJE LEVAS	
2	2	BLOQUE_EJE_2	BLOQUE MADERA SUJECCIÓN EJE LEVAS	
3	1	EJE	EJE DE LEVAS	
4	1	RUEDA_PALETAS	RUEDA DE PALETAS	
5	2	BLOQUE_PIVOTE	BLOQUE PIEDRA SUJECCIÓN PIVOTE BALANCINES	
6	1	PIVOTE	PIVOTE BALANCINES	
7	6	PISTÓN	PISTÓN	
8	6	PERNO_1	PERNO CONEXIÓN PISTÓN-BALANCÍN	
9	6	BALANCÍN	BALANCÍN	
10	12	HORQUILLA_1	HORQUILLA SUJECCIÓN	
11	6	PERNO_2	PERNO CONEXIÓN PIVOTE-BALANCÍN	
12	12	CLAC_1	VÁLVULA CLAC	
13	12	CLAC_2	TAPA VÁLVULA CLAC	
14	1	TUBERÍA	TUBERÍA CENTRAL	
15	6	CILINDRO	CILINDRO	
16	24	TORNILLO_1	TORNILLO BASE CILINDRO	
17	24	TORNILLO_2	TORNILLO CONEXIÓN CILINDRO-TUBERÍA	
18	24	TUERCA_1	TUERCA CONEXIÓN CILINDRO-TUBERÍA	
Diseño de Ildefonso Cabeza Águila		Revisado por	Aprobado por	Fecha 07/11/2020
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JÁEN		BOMBA DE SEIS CILINDROS		
		PLANOS BOMBA DE SEIS CILINDROS, TAQI AD-DÏN		Unidad milímetros
				Hoja 1 / 6

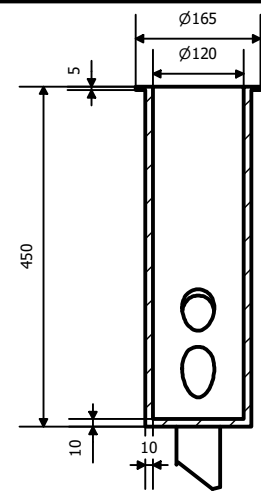


LISTA DE PIEZAS				
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	
1	2	BLOQUE_EJE	BLOQUE PIEDRA SUJECIÓN EJE LEVAS	
2	2	BLOQUE_EJE_2	BLOQUE MADERA SUJECIÓN EJE LEVAS	
3	1	EJE	EJE LEVAS	
5	2	BLOQUE_PIVOTE	BLOQUE PIEDRA SUJECIÓN PIVOTE BALANCINES	
Diseño de Ildefonso Cabeza Águila		Revisado por	Aprobado por	Fecha 07/11/2020
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JÁEN		BOMBA DE SEIS CILINDROS		
		PLANOS BOMBA DE SEIS CILINDROS, TAQI AD-DIN		Unidad milímetros
				Hoja 2 / 6

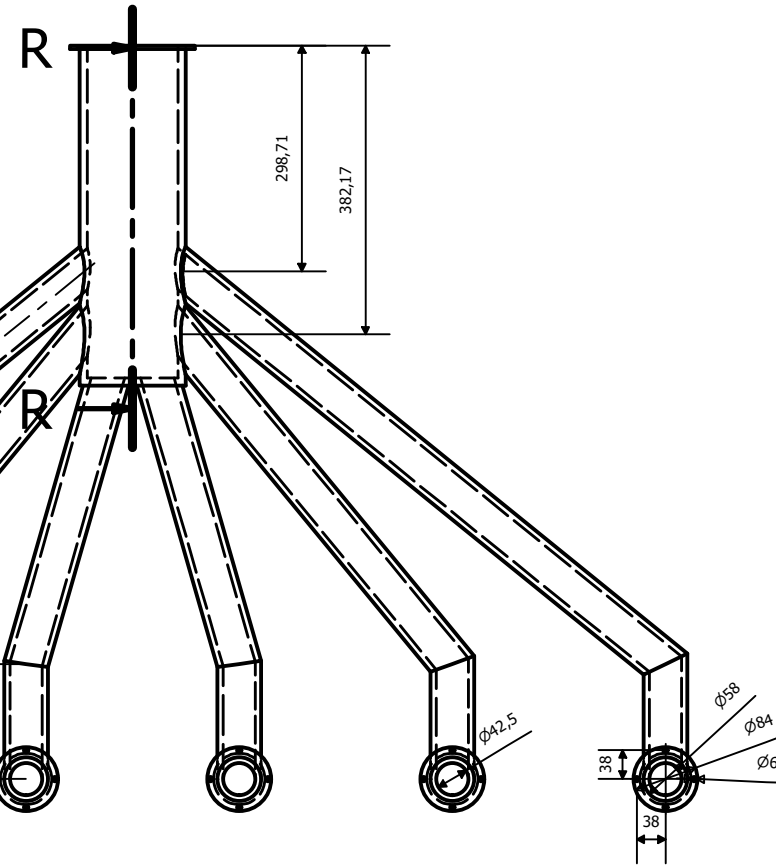


A-A (1 : 10)

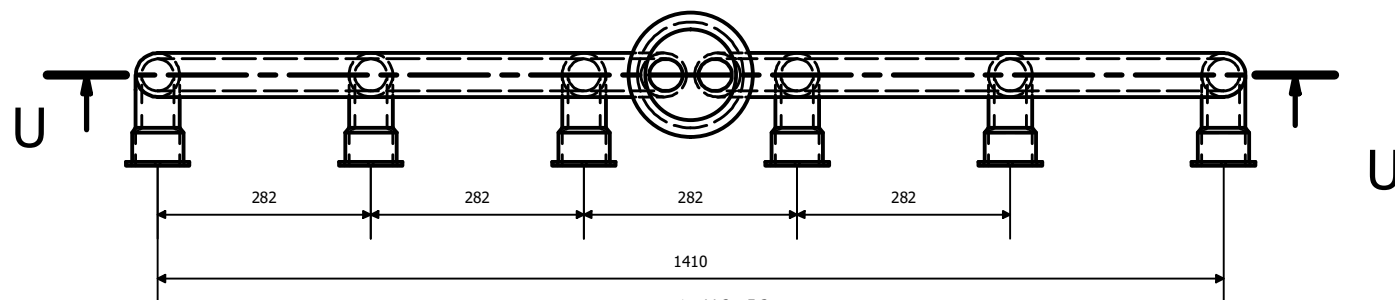
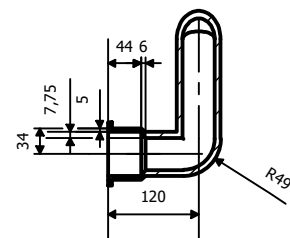
LISTA DE PIEZAS				
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA		DESCRIPCIÓN
4.1	1	RUEDA_PALETAS		EJE RUEDA PALETAS
4.2	1	RUEDA_PALETAS		PALETA UNITARIA
Diseño de Ildefonso Cabeza Águila		Revisado por	Aprobado por	Fecha 07/11/2020
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JÁEN		BOMBA DE SEIS CILINDROS		
		PLANOS BOMBA DE SEIS CILINDROS, TAQI AD-DIN		Unidad milímetros
				Hoja 3 / 6



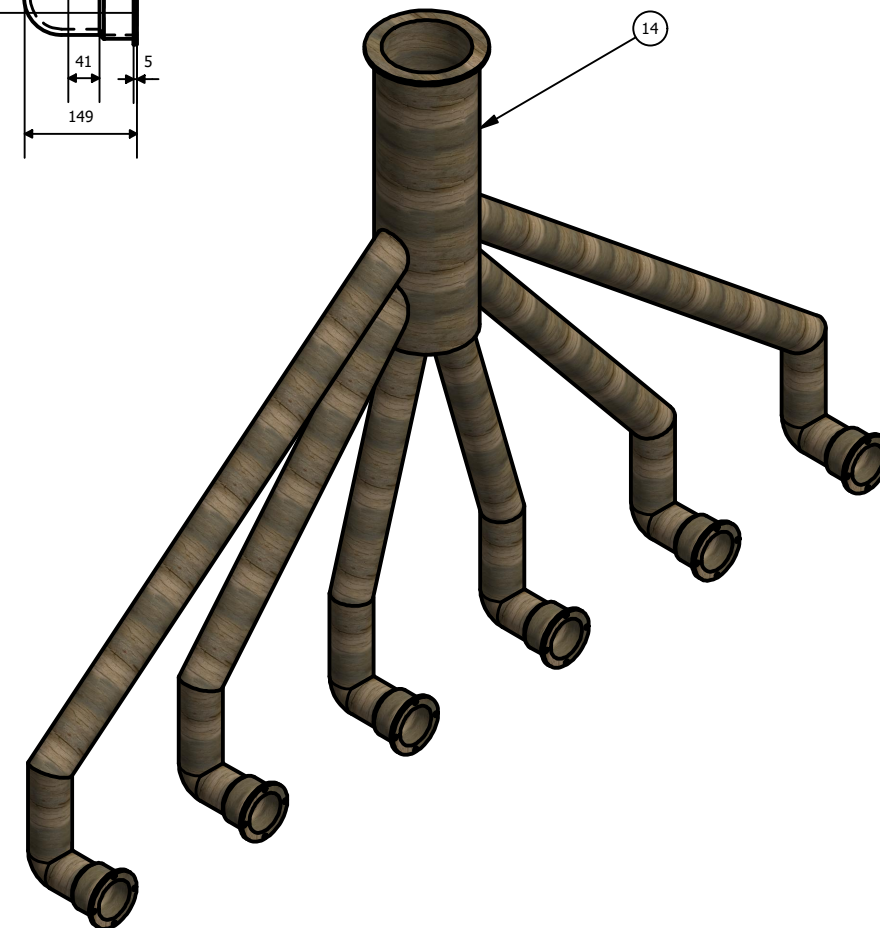
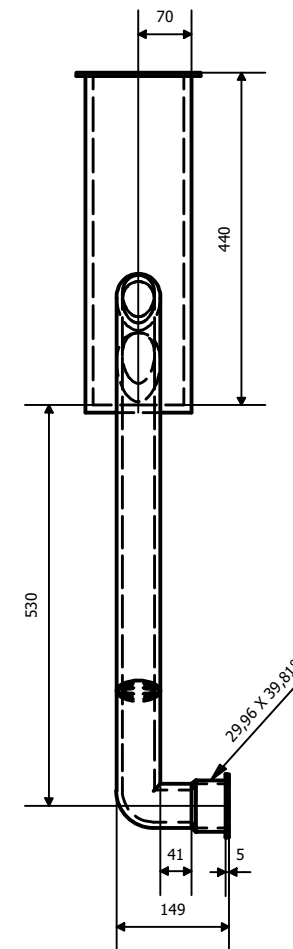
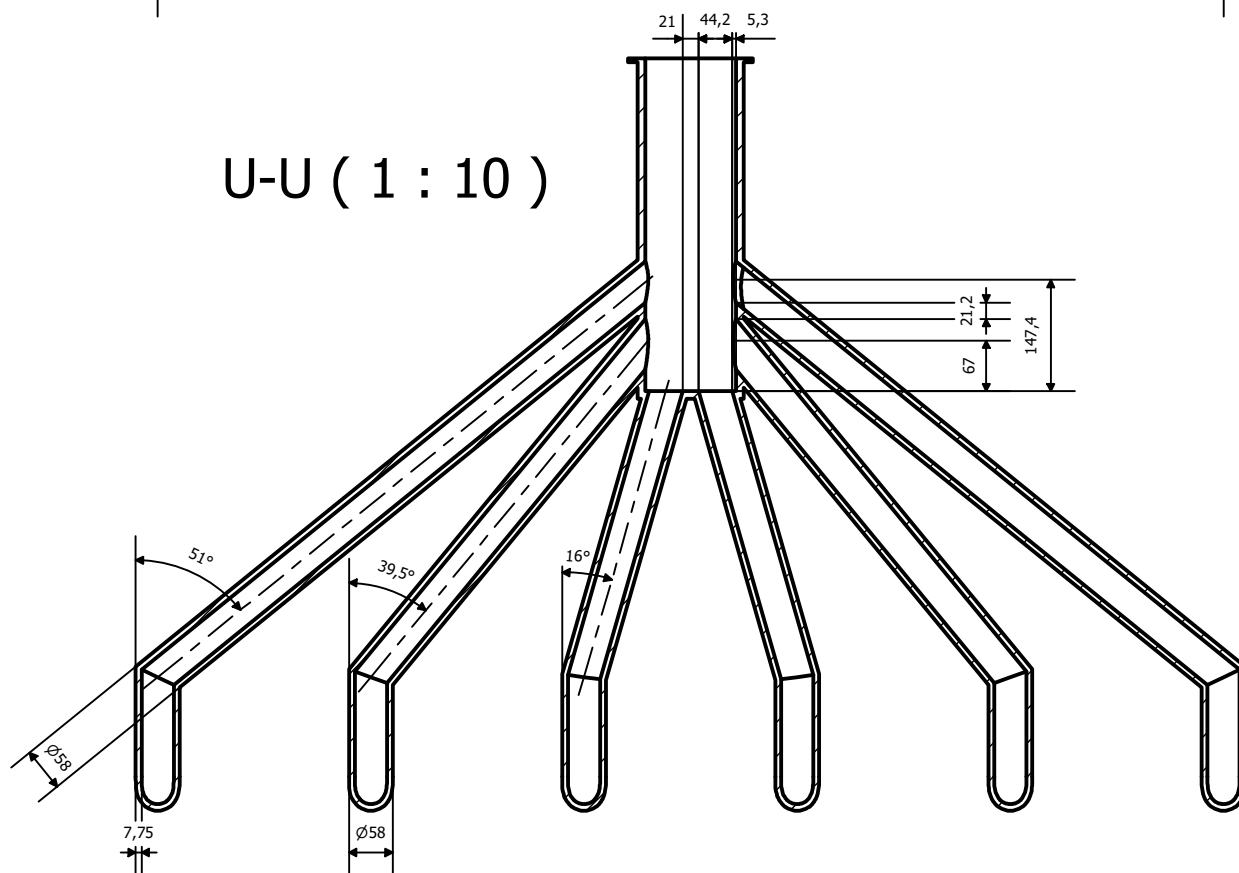
R-R (1 : 10)



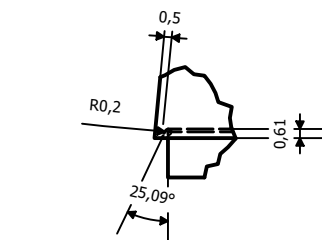
V-V (1 : 10)



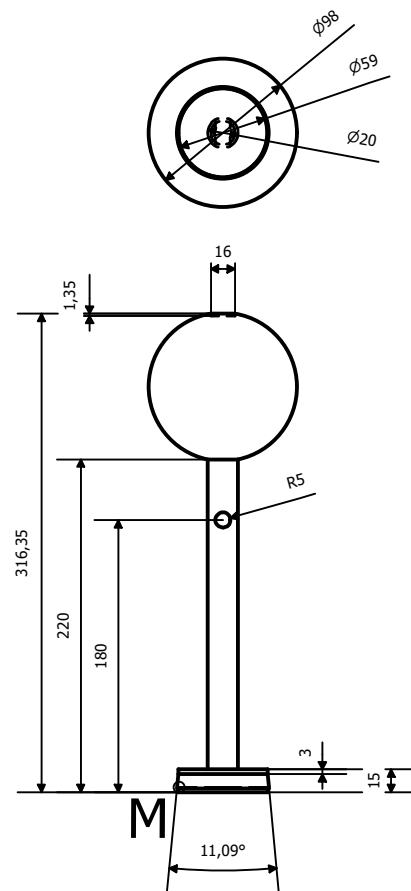
U-U (1 : 10)



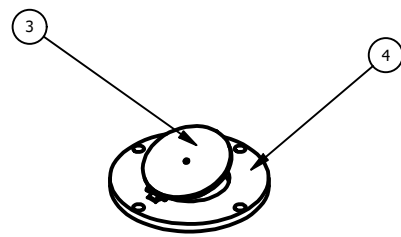
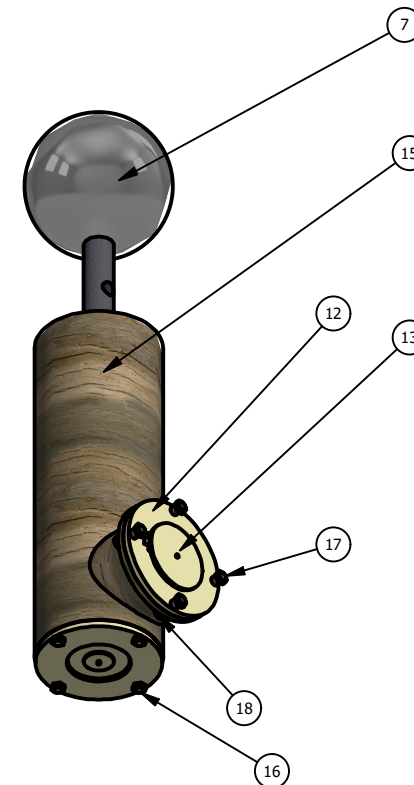
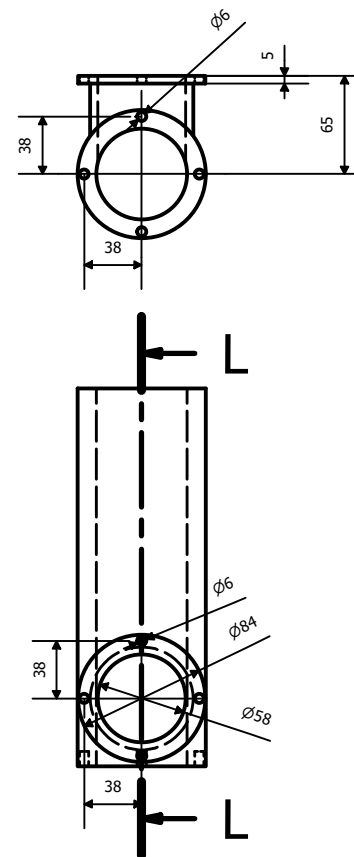
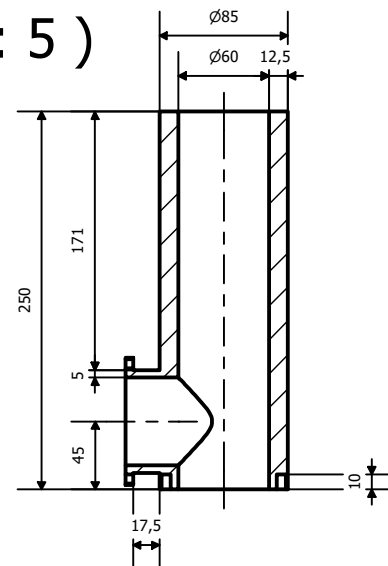
LISTA DE PIEZAS				
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	
14	1	TUBERÍA	TUBERÍA CENTRAL	
Diseño de Ildefonso Cabeza Águila	Revisado por	Aprobado por	Fecha 07/11/2020	Escala 1:10
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JÁEN		BOMBA DE SEIS CILINDROS		
		PLANOS BOMBA DE SEIS CILINDROS, TAQI AD-DIN	Unidad milímetros	Hoja 5 / 6



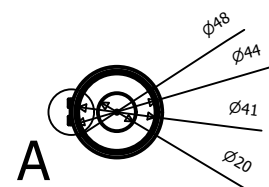
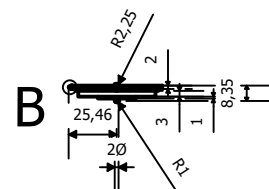
M (2:1)



L-L (1:5)

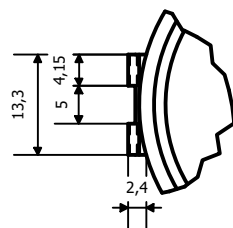


(ESC: 1:4)

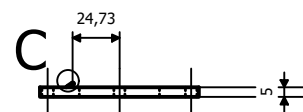
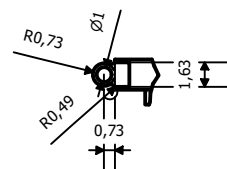


(ESC: 1:4)

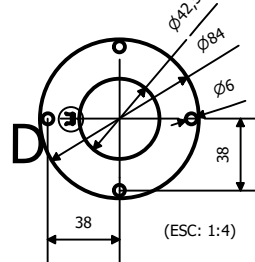
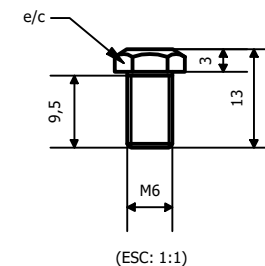
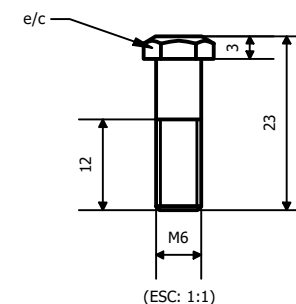
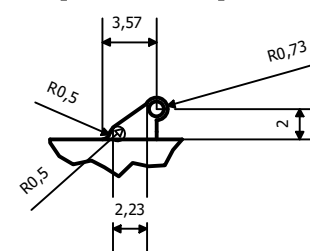
A (1:1)



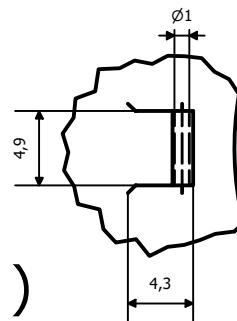
B (2:1)



C (2:1)



D (2:1)



LISTA DE PIEZAS				
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	
7	6	PISTÓN	PISTÓN	
12	12	CLAC_1	VÁLVULA CLAC	
13	12	CLAC_2	TAPA VÁLVULA CLAC	
15	6	CILINDRO	CILINDRO	
16	24	TORNILLO_1	TORNILLO BASE CILINDRO	
17	24	TORNILLO_2	TORNILLO CONEXIÓN CILINDRO-TUBERÍA	
18	24	TUERCA_1	TUERCA CONEXIÓN CILINDRO-TUBERÍA	
Diseño de		Revisado por	Aprobado por	Fecha
Ildefonso Cabeza Águila				07/11/2020
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JÁEN		BOMBA DE SEIS CILINDROS		
		PLANOS BOMBA DE SEIS CILINDROS, TAQI AD-DIN		Unidad milímetros
				Hoja 6 / 6