

Estudio histórico-tecnológico, modelado y reconstrucción a escala de la bomba de seis cilindros de Taqī ad-Dīn

Rafael Lopez-García¹, Idefonso M. Cabeza-Águila², Rubén Dorado-Vicente³, Gustavo Medina-Sánchez⁴

¹Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera, Universidad Jaén, Jaén, España. rlgarcia@ujaen.es

²Graduado en Ingeniería Mecánica, Universidad Jaén, Jaén, España. aca00068a@red.ujaen.es

³Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera, Universidad Jaén, Jaén, España. rdorado@ujaen.es

⁴Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera, Universidad Jaén, Jaén, España. gmedina@ujaen.es

Resumen

El trabajo expone un estudio histórico y un análisis tecnológico de uno de los mecanismos más ingeniosos de la Edad Media en Oriente, época que puede considerarse una de las etapas más oscuras, en lo que al progreso tecnológico se refiere. Sin embargo, podemos desmentir esta calificación por aportaciones como las de *Taqī Ad-Dīn* (1526-1585).

En este artículo se aborda el estudio de la obra magna de este inventor, "*Al-Turuq al-samiyya fi al-alat al-ruhaniyya*" o "*Los Métodos Sublimes para Máquinas Espirituales*" (1551) dentro de la cual nos centramos en el análisis de su máquina más relevante, "La Bomba de Seis Cilindros".

Se trata de una máquina hidráulica de elevación de agua, siendo el agua en movimiento de un río, tanto la fuente de energía del artilugio como la fuente de suministro de la bomba. Esta funcionalidad se obtiene mediante el uso de seis cilindros en línea, inaudito en aquella época, con sus correspondientes pistones, varias válvulas anti retorno, movidos por una serie de levas y balancines.

Una vez conocido su funcionamiento, se realizará una descripción de los componentes del mecanismo, su papel dentro de este artilugio y sus características y peculiaridades más significativas.

Debido a las escasas aportaciones dimensionales existentes sobre la máquina, se realizará una interpretación de la "La Bomba de Seis Cilindros" con una reconstrucción virtual de ella, utilizando para ello un software de modelado geométrico. También se realizará una animación virtual para apreciar su funcionamiento, y mediante los módulos de ingeniería asistida, poder llevar a cabo el análisis mecánico de sus elementos más característicos. Finalmente, se realizará la reconstrucción a escala del mecanismo, empleando para ello diferentes tecnologías y materiales, lo que nos permitirá apreciarlo de una forma aproximada a la que el autor plasmó en su obra.

Palabras clave: Historia de las máquinas y los mecanismos, modelado geométrico, ingeniería asistida, fabricación aditiva.

Abstract

This work presents both a historical study and a technological analysis of one of the most ingenious mechanisms of the Middle Ages in the East, specifically in Damascus. This time can be considered one of the darkest stages, as far as technological progress is concerned. However, we can refute this qualification by contributions such as those of *Taqī Ad-Dīn* (1526-1585). This article has addressed a study of the great work of this inventor, "*Al-Turuq al-samiyya fi al-alat al-ruhaniyya*" or "The Sublime Methods for Spiritual Machines" (1551). Thus, within this work, we focus on the technological analysis of his most relevant hydraulic machine, "The Six Cylinder Pump".

The aforementioned mechanism is a hydraulic machine for lifting water, the moving water of a river being both the source of energy for the device and the source of supply for the pump. This functionality is obtained through the use of six cylinders in line, unheard of at that time, with their corresponding pistons, actuated by gravity and

together with several non-return valves. Thus, we understand this set as the heart of the machine, which will be moved by a series of cams and rockers.

Once its operation has been explained, a description will be made of the multiple components of the mechanism, their role within this device and its most significant characteristics and peculiarities.

Due to the scarce dimensional contributions of the inventor on his machine, an interpretation of "The Six Cylinder Pump" will be made with a virtual reconstruction of it, using for this mission a geometric modeling software capable of facilitating a satisfactory virtual reconstruction. A virtual animation will also be carried out to appreciate the mode of operation, and through the assisted engineering modules, to be able to carry out the mechanical analysis of its most characteristic elements.

Finally, the scale reconstruction of the mechanism will be carried out, using different technologies and materials, which will allow us to appreciate it in a somewhat approximate way to what the author captured in his work.

Keywords: History of machines and mechanisms, geometric modelling, computer-aided engineering, additive manufacturing.

1. Introducción

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. De entre los anteriores, nosotros fijaremos nuestra atención en uno de esos eruditos, Taqī Ad-Dīn, quién alrededor de 1551, escribió su obra magna "El Sublime Método de las Máquinas". Orientada hacia la estructura geométrico-mecánica de las máquinas, utilizando el método de análisis usado con anterioridad por Banū Mūsā y Al-Jazarī [1,2]. En la citada obra, se encuentran números inventos como clepsidras, dispositivos para elevar tanto pesos como

los árabes (1976) a pesar de que estar dañado en un 35% debido a la humedad y a su mala conservación.

Lo que evidencia la importancia del tratado, es que "completa un eslabón perdido en la historia de la tecnología árabe y, en particular, en la historia de la ingeniería mecánica árabe. Además, describe varias máquinas nuevas que no se mencionaron en los libros anteriores" [3]. Asimismo, la importancia de la obra radica en su singularidad en comparación con 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.



Figura 1. Primeras tres páginas descripción bomba de seis cilindros en Chester Beatty MS de Al-Turuq al-Saniya. a) página 36, b) página 37, c) página 38.

agua, fuentes y hasta una máquina giratoria de vapor, muy anterior a de la Giovanni Branca en 1629. Este libro tiene un enfoque y estilo simples, inteligibles y precisos. 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, lo que sin duda ayuda de sobremanera al entendimiento de sus inventos. Una curiosidad de este escrito es que el Dr. Ahmad Y. Hassam, de la Universidad de Alepo lo consigue reproducir en el I Congreso Mundial de Historia de las Ciencias entre

Si nos centramos en el invento más relevante de Taqī Ad-Dīn, "La Bomba de Seis Cilindros", el autor la describe con orgullo con las siguientes palabras textuales: "Este es un método immaculado. Es el más perfecto de cualquiera de los anteriores". Las evidencias bibliográficas de este invento en el manuscrito Al-Turuq al-Saniya fī al-‘alat al-rūhaniya, las podemos encontrar en la Biblioteca Chester Beatty de Dublín, que dispone de una copia manuscrita de esta obra, fechada en 1551 y 1552. Y es en sus tres primeras páginas donde se describe la máquina de estudio (véase en las figura 1 (a), (b) y (c)) [4].

2. Bomba de Seis Cilindros

En este apartado nos adentraremos en profundidad en la explicación del funcionamiento y composición de esta máquina de elevación de agua. Una vez concretada la fuente de energía de la bomba, la siguiente cuestión reside en su composición material, en la que la madera será su componente mayoritario. No hay vestigios de que esta máquina llegara a construirse, pero en caso de que así lo fuera y contando con la ubicación geográfica del ingeniero, Damasco, nos hace pensar que el material utilizado podría ser madera de roble o pino. Aunque Siria pueda considerarse, a priori, una ubicación con zonas áridas y semi-áridas se distingue por un importante gradiente de diversidad fitogeográfica [5].

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. Viéndose en la figura 2, un ensamblaje completo de la máquina de estudio.

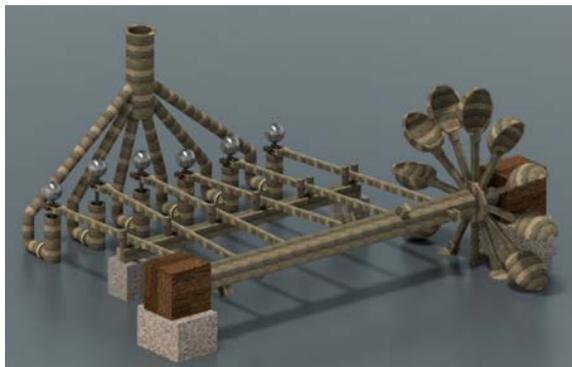


Figura 2. Propuesta virtual de la bomba de seis cilindros.

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 entre estas dos. Este movimiento ascendente del balancín hace que se eleve el pistón, el cual cuenta con un peso de plomo en su extremo superior. En este movimiento ascendente (figura 3) se crea un vacío dentro del cilindro empezando a llenarse de agua, pasando por una válvula clac (n° 1) (parte inferior del cilindro), que en ese caso secciona, abriéndose. Otra válvula clac (n° 2) (lateral inferior cilindro) colocada en la tubería que une el tubo de suministro y el cilindro se cierra por la aspiración del pistón a lo largo del cilindro.

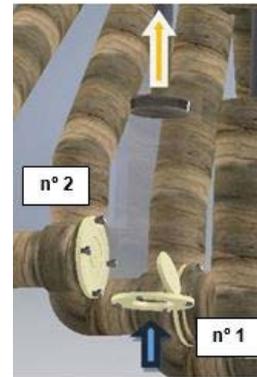


Figura 3. Movimiento ascendente del pistón.
Elaboración propia.

A medida que el árbol de levas ejerce toda su fuerza sobre los balancines, con un simple contacto, el balancín es liberado. En este momento la barra de madera ya no dispone de una fuerza que la haga seguir bajando, determinándose así la carrera del pistón dentro del cilindro, ya que el movimiento del pistón depende del balancín. Posteriormente el pistón, por su propia gravedad y la del peso cortante del plomo, empuja la masa de agua de forma descendente, provocando el cierre de la válvula clac n° 1. Así, este flujo de agua se ve obligado a buscar otra salida, y encuentra poca resistencia en la válvula clac n° 2, debido a su sentido de apertura y proporciona suministro, véase figura 4. Al final del recorrido estas tuberías se unirán en una, la tubería central a las tuberías que en el final de su recorrido se unirán en una sola, la tubería central.

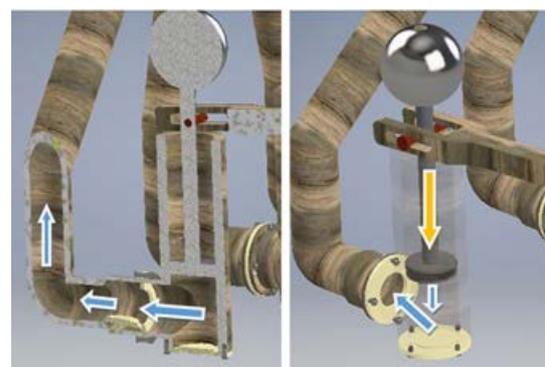


Figura 4. Movimiento descendente del pistón.
Elaboración propia.

3. Modelado geométrico

Siguiendo con la exposición funcional de esta máquina, trataremos el diseño virtual del artefacto. El software CAD de soporte elegido ha sido *Inventor Professional 2018*, un producto diseñado por

Autodesk, dentro de su gama *Product Design Collection*, [6]. 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.

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*.

3.1. 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.” [4].

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” [7]. 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 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, contiene; bocetos virtuales, cálculos, además de videos animados del funcionamiento del conjunto [4]. De estos últimos se han obtenido las interpretaciones apropiadas para proyectar un estudio representativo y claro de la máquina.

3.2. Sistema de movimiento del eje de levas.

Este sistema está comprendido por unos apoyos a ambos lados del río, aunque también pueden estar sumergidos por él, y entre estos apoyos se encuentran un eje de levas con una rueda de paletas empotrada en un extremo del mismo.

Empezaremos profundizando en el eje de levas, el cual contará con una forma hexagonal, y será

extruida. 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. Estas levas se distribuirán cada 60° de forma equidistante. Se puede observar que en los extremos se han añadido una serie de extrusiones, las cuales se alojan en un bloque de madera, apoyos, 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 paletas, se ha realizado un vaciado en forma de cuadrado, para conseguir una restricción mutua que permite el giro simultáneo, como se puede ver en la figura 5.

En lo relativo a la rueda de paletas es la encargada de aprovechar la energía cinética que contiene el agua que arrastra un río, en beneficio del movimiento de la máquina. El modelado de esta pieza se trata de diseñar el un eje con extrusiones para una enlace macho-hembra con el eje de levas y el apoyo. En lo que respecta al diseño de las cucharas se utilizará una revolución de 360° sobre este mismo eje de la rueda, contando esta con doce unidades.



Figura 5. Sistema de movimiento del eje de levas.
Elaboración propia.

3.3. Sistema de bombeo

La leva tiene un ángulo de incidencia en los balancines cuyo resultado será el movimiento vertical de los pistones. Estas barras pivotan una estructura, que de la misma manera que el sistema del eje de levas, tendrá unos apoyos a ambos lados del río o sumergidos en él. Esta estructura se trata de una larga viga de madera, con seis alojamientos delimitados por dos trozos rectangulares de madera extruidos perpendicularmente a dicha viga. La conexión de la estructura y los balancines se hará a través de pernos.

Las conexiones tanto de la estructura con los balancines como de estos con los pistones serán ambas a través de pernos. Sin embargo estas últimas presentan una salvedad, las aberturas en los mencionados extremos, las cuales sirven para evitar tensiones en la transición de un movimiento circular a un movimiento lineal. En definitiva, el perno de unión de estos elementos girará y se trasladará a lo largo de

estas aberturas. Se puede observar en el ensamblaje de este sistema de bombeo en la figura 6.

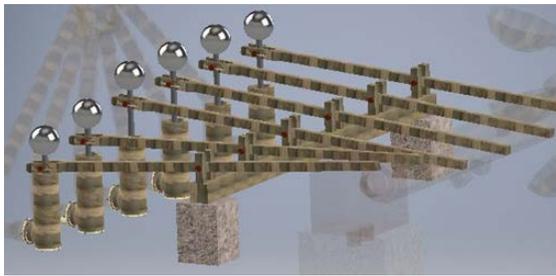


Figura 6. Sistema de bombeo. Elaboración propia.

En lo referente a los cilindros, *Taqī ad-Dīn* 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 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, regula también con una válvula clac, como se ha podido apreciar en el apartado expositivo del funcionamiento de la máquina. Para la colocación de esta válvula en el cilindro se elaborarán unos orificios en la parte inferior del mismo, mientras que para su sujeción se utilizarán tornillos.

3.4. Sistema de tuberías

Este conjunto de conductos compromete la recogida del caudal impulsado por los seis cilindros. Para la confección de este sistema empezaremos por la tubería principal de salida, en ella se unen los diferentes caudales. Así, se quiere destacar esto último en la figura 7, en la que se muestra una visión de corte de la pieza de las sub-tuberías confluyendo en una sola.

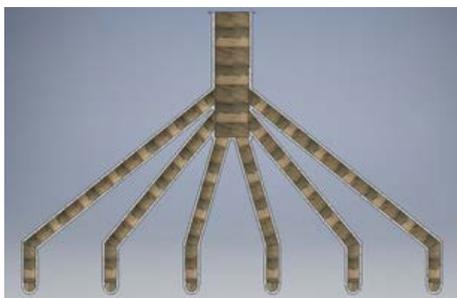


Figura 7. Sistema de tuberías. Elaboración propia.

Dado que esta válvula clac que une el cilindro con el sistema de tuberías debe de abrirse hacia dicho sistema, 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. 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, como se observa en la figura 8.

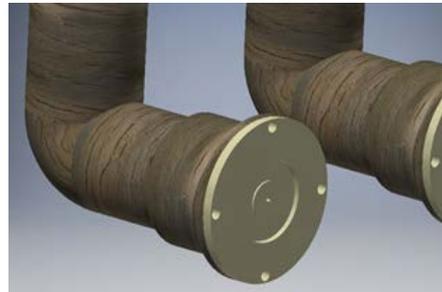


Figura 8. Alojamiento para el libre movimiento de la válvula clac dentro del sistema. Elaboración propia.

4. Análisis del mecanismo

Para la realización de este apartado se ha recurrido a un software diferente al de diseño, tratándose de la herramienta de simulación *SolidWorks 2020* de la compañía *Dassault Systemes*, [8]. 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.

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*, 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 manuscritos originales, o solo fue plasmada en dicho manuscrito a modo de ocurrencia, [4].

4.1. Cálculos de funcionamiento

Una de las medidas a suponer es la carrera del pistón dentro del cilindro. Esta medida será crucial para identificar el ángulo de accionamiento de la leva en el balancín y de esta manera poder realizar un análisis mecánico, a través de simulaciones por ordenador, lo más fiable posible.

Seguidamente, un parámetro para el correcto funcionamiento correcto de la máquina, es determinar el peso mínimo que deben tener las plumas que se encuentran encima de los pistones. Esto es así, porque

será la acción de la gravedad sobre estas plomadas la que proporcionará la presión necesaria que bombé el fluido hacia las tuberías en el tiempo requerido.

Para poder bombear agua dentro de las tuberías, se deben igualar las presiones a ambos lados de la válvula clac que une los cilindros con el sistema de tuberías. Además, el pistón tiene que encontrarse en su punto muerto inferior antes de volver a ser accionado, esto se convierte en tarea principal para su adecuado funcionamiento. De modo que el cálculo implica la participación de distintos factores a tener en cuenta junto al tiempo:

- Peso del fluido contenido en el sistema de tuberías.
- Pérdidas por fricción dentro de las tuberías.
- Pérdidas de rozamiento del pistón dentro del cilindro.
- Aprovechamiento del peso del pistón, en beneficio de reducir el volumen de las plomadas.

Una vez calculado este peso adecuado para la máquina en un caso extremo, nos preguntamos si el vástago será capaz de aguantar este peso de la plomada. Por lo que se realiza una simulación para dicho comportamiento. Conociendo que el diámetro mínimo para que el vástago pandee con este peso adicional, multiplicamos por su factor de seguridad de 3,7. Para realizar esta simulación hemos tenido que suponer que el pistón se compone de hierro forjado. Una vez introducidos todos los parámetros en el software, se puede ver en la figura 9 el resultado, donde se puede observar que la tensión máxima corresponde a un valor muy por debajo del límite elástico del material supuesto, el hierro forjado.

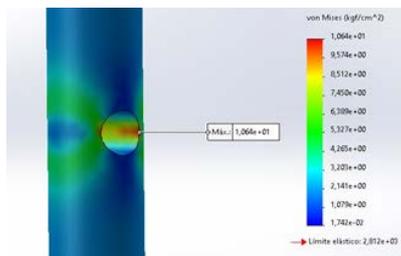


Figura 9. Mapa de tensiones de Von Mises, pistones. Elaboración propia.

4.2. Análisis del movimiento

Debido a la complejidad del entramado, se ha realizado el análisis de movimiento sobre el esquema cinemático simbólico de la máquina, respetando las dimensiones establecidas y forma de cada elemento. Con lo que ha supuesto las condiciones mecánicas de las partes móviles, de tal manera que los balancines y el eje de levas son de madera de roble y ya se ha mencionado con anterioridad al pitón.

La parte más vulnerable de esta máquina puede llegar a ser los balancines, por el estrés que provocaría al material, el continuo movimiento de vaivén. Por esta razón es la primera pieza a analizar. En la vista de lo

anterior propondremos las siguientes condiciones anteriormente calculadas:

- Velocidad de giro del eje de levas: 2,5 rad/s.
- Fuerza de peso de las plomadas: 52,7 N.

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.

Elegimos el mapa de tensiones de von Mises, en el punto donde la aceleración es máxima, con un valor de tensión cercano al límite elástico del roble. 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, se muestra el resultado de la simulación en la figura 10.

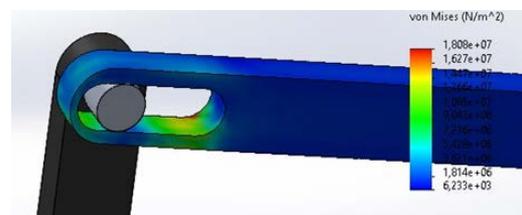


Figura 10. Mapa de tensiones de Von Mises, cogida balancín-pistón. Elaboración propia.

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 (figura 11), donde las tensiones se reparten sobre toda la pieza pero tiene su máximo en el contacto con el balancín, con un valor muy inferior al límite elástico.

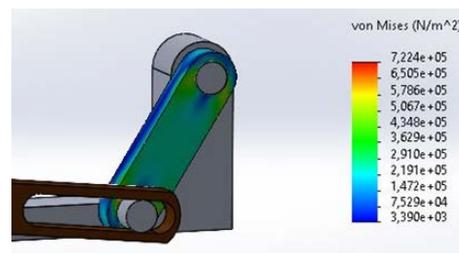


Figura 11. Mapa de tensiones de Von Mises, leva. Elaboración propia.

Por último gracias al software SolidWorks, se hayan las curvas de aceleración del pistón a lo largo del cilindro, desde el punto muerto inferior hasta el punto muerto superior, con ello se puede realizar una aproximación de la fuerza de absorción del pistón, y como consecuencia la entrada de agua. El comienzo de este análisis empieza cuando el eje de levas conecta con el balancín y ejerce toda su fuerza en los primeros instantes, el pistón tiene una velocidad muy fuerte al principio. 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.

Una gráfica clave para la comprensión de este cálculo es la resultante de la aceleración, contando con sus componentes normal y tangencial en el movimiento acelerado del pistón, como se observa en la figura 12.

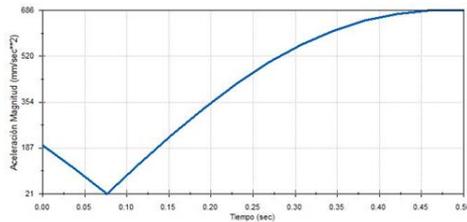


Figura 12. Gráfica de la aceleración resultante del movimiento del pistón. Elaboración propia.

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 ya que se encuentra sumergido en agua, esta cavidad se llenará de fluido. 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. Adicionalmente, conociendo que la presión se trata de la fuerza aplicada partido por la sección en la que se aplica dicha fuerza y siendo dependiente del tiempo esta ecuación, nos queda la siguiente gráfica representada en la figura 13. De esta manera se reparte de presión dentro del cilindro de una manera aproximada.

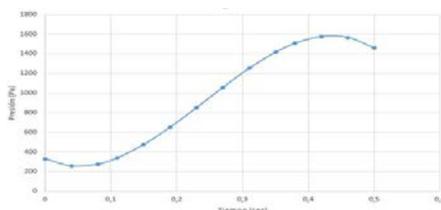


Figura 13. Gráfica del reparto de las presiones dentro del cilindro en la subida del pistón. Elaboración propia

5. Reconstrucción real a escala

Para la reconstrucción se ha optado por la impresión 3D, con el método de modelado por deposición fundida, FDM.

Como herramientas informáticas, para la reconstrucción virtual se ha utilizado *Inventor Professional 2018* y *Cura 3.6*, un software de impresión 3D, por su simplicidad y manejo intuitivo. El hardware utilizado es la impresora *Witbox* de la marca "Bq", y el material usado se trata del filamento de plástico PLA+(ácido poliláctico con aditivos), [9], con las siguientes características:

- 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 de impresión: 200/220 °C
- Temperatura de flexión bajo carga: 56°C (ISO 75/2B)
- Temperatura transición vítrea: 56/64°C (ASTM D34 18)

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, y los detalles de la máquina que se quieren mostrar, 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.

Finalmente, la "Bomba de Elevación de Agua de Seis Cilindros" de *Taqī ad-Dīn* podemos verla completa y ensamblada en la figura 14, donde se puede observar que las últimas tres paletas no están colocadas porque, están diseñadas para introducirse en la fuente de agua en movimiento.

6. Conclusiones

La tecnología contemporánea, por medio de softwares de modelado virtual así como la elaboración de complejas simulaciones, une la comprensión de nuestro pasado con el presente. Aunque en la antigüedad los medios para expresarse y dejar constancia de su legado eran escasas, a día de hoy podemos interpretar esos escritos de una forma cerca a la realidad de aquel momento. La importancia de la reconstrucción histórica, conlleva una disciplina pedagógica muy valiosa para las presentes y futuras civilizaciones, puesto conocer el origen de algunos objetos a veces nos lleva a reinventar unos nuevos.

Al respecto de las herramientas de diseño en la ingeniería se puede hacer referencia a las empleadas en este proyecto como el software CAD, (Computer Aided Desing), donde un sistema permite crear, modificar, analizar y optimizar planos en dos y tres dimensiones, en nuestro caso el *Inventor Professional 2018*. Otro software fundamental son los softwares CAM, (Computer Aided Manufacturing), sistemas informáticos que con la ayuda del control numérico son capaces de fabricar piezas, con la ayuda de herramientas, como es *Cura 3.6*. Y por último otro tipo de software utilizado son los CAE, (Computer Aided Engineering), estos sistemas verifican los elementos diseñados mediante CAD, para observar si así cumplen las expectativas deseadas, como es el apartado de simulación de *SolidWorks 2020*, [10].



Figura 14. Ensamblaje de la bomba de seis cilindros de Taqī ad-Dīn. Elaboración propia.

En lo referente al proceso de impresión 3D, por FDM, se ha intentado aplicar 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.

Con los materiales propuestos y las pocas dimensiones aportadas 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 frente a la humedad del agua. Dadas sus dimensiones su caudal por segundo es grande, pero debido a la época preservar la estanqueidad del sistema sería una ardua tarea, y la máquina perdería poder de bombeo. Sin perjuicio de lo anterior, no se puede negar la genialidad del artefacto para su época, y lo podemos ver, anteriormente mencionado, como el estilo de esta máquina era muy diferente al de sus análogos en otras partes del mundo, y separados cientos de años entre ellos.

7. Referencias

[1] Bautista E et al 2007 Breve Historia Ilustrada de las Máquinas Madrid Foundation of the Valencian International University.

[2] 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 (<https://www.labrujulaverde.com/2016/06/banu-musa-los-tres-hermanos-persas-que-ideaban-automatas-en-el-siglo-ix#>)

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

[4] 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) (<https://muslimheritage.com/six-cylinder-water-pump-taqi-din/>)

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

[6] Autodesk 2020 Manual del ingeniero 2021 de Autodesk. (<http://help.autodesk.com/view/INVNTOR/2020/ESP/?guid=GUID-C2452393-D245-49DA-AFBC-9E67830ECEE>)

[7] Prieto E. 2008 Breve historia de la metrología, de Centro Español de Metrología. (https://www.cem.es/sites/default/files/files/breve%20historia_de%20la%20metrologia_doc.pdf)

[8] Dassault Systèmes 2011 Guía del estudiante para el aprendizaje del software SolidWorks® 2021 de Dassault Systèmes. (https://www.solidworks.com/sw/docs/Student_WB_2011_ESP.pdf)

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

[10] Bonilla A. 2003. Herramientas de diseño e ingeniería Bizkaia.eus Capítulo 1 2-11 De Robotiker Base de datos.