



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior (Jaén)

Trabajo Fin de Máster

ANÁLISIS, DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROTOTIPO DE LA MÁQUINA DE VAPOR CORNISH

Alumno/a: Pérez Viedma, María

Tutor/a: Prof. D. Rafael López García
Prof. D. Eloísa Torres Jiménez

Dpto.: Ingeniería Mecánica y Minera

Marzo, 2020



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

Don RAFAEL LÓPEZ GARCÍA y doña ELOÍSA TORRES JIMÉNEZ , tutores del Proyecto Fin de Carrera titulado: ANÁLISIS, DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROTOTIPO DE LA MAQUINA DE VAPOR CORNISH, que presenta MARÍA PÉREZ VIEDMA, autorizan su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, MARZO de 2020

El alumno:

PEREZ VIEDMA MARIA -
15520867F
Digitally signed by PEREZ VIEDMA MARIA -
15520867F
Date: 2020.03.17 11:29:06 +01'00'

MARÍA PÉREZ VIEDMA

Los tutores:

LOPEZ GARCIA RAFAEL -
24149521G
Firmado digitalmente por LOPEZ GARCIA RAFAEL -
24149521G
Fecha: 2020.03.17 09:34:50 +01'00'

RAFAEL LÓPEZ GARCÍA

ELOÍSA TORRES
JIMÉNEZ

ANÁLISIS DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROTOTIPO DE LA MÁQUINA DE VAPOR CORNISH.

AUTOR: MARÍA PÉREZ VIEDMA

TUTOR: RAFAEL LÓPEZ GARCÍA

COTUTOR: ELOÍSA TORRES JIMÉNEZ

AGRADECIMIENTOS:

Este apartado es en agradecimiento a todas las personas que se han involucrado y me han ayudado a la realización del presente trabajo de forma desinteresada. En especial le agradezco la ayuda a mi padre, cuya ayuda y apoyo en la fabricación del prototipo ha sido esencial para su finalización.

A todas estas personas, gracias.

Índice

1. Introducción.....	4
2. Antecedentes históricos de la máquina de vapor	4
2.1 Primeras máquinas de vapor: Máquinas de Savery y Newcomen	4
2.2 Máquina de James Watt.....	6
3. Máquina de vapor tipo Cornish.....	7
3.1 Principales diferencias entre la máquina Cornish y la de Boulton y Watt.....	8
3.2 Características principales	9
4. Descripción elementos principales	12
5. Principio de funcionamiento	28
5.1 Recorrido interno.....	28
5.2 Recorrido externo.....	30
5.3 Ciclo termodinámico de la máquina.....	31
6. Modelado tridimensional de la máquina	44
6.1 Antecedentes	44
6.2 Diseño actualizado.....	45
6.3 Análisis mecánico al modelo	49
7. Modelo a escala	54
7.1 Escala	54
7.2 Tecnologías usadas para la fabricación del modelo	54
7.2.1 Fabricación aditiva	55
7.2.2 Fabricación convencional.....	63
7.3 Elementos adquiridos.....	65
8. Fabricación de los elementos.....	70
8.1 Fabricación mediante deposición de hilo fundido	70
8.1.1 Material empleado.....	71
8.1.2 Equipo utilizado.....	73
8.1.3 Parámetros a tener en cuenta durante la deposición de hilo fundido.....	75
8.1.4 Piezas fabricadas con PLA.....	76
8.1.5 Piezas fabricadas con fibra Onyx	82
8.2 Fabricación mediante estereolitografía (SLA).....	83
8.2.1 Material empleado.....	83
8.2.2 Equipo utilizado.....	84
8.3 Fabricación mediante mecanizado	85
8.3.1 Material empleado.....	85
8.3.2 Equipo utilizado.....	86

8.3.3	Piezas fabricadas.....	86
9.	Montaje	87
9.1	Montaje neumático.....	87
9.2	Montaje mecánico	90
10.	Prototipo final.....	100
11.	Optimización de piezas impresas	101
12.	Conclusión y trabajos futuros.....	110
	Bibliografía	111
	Índice de ilustraciones.....	113
	Índice de tablas	116

1. Introducción

El objeto de investigación de este trabajo parte de un estudio previo realizado en el trabajo de fin de grado en el que se realiza una investigación sobre la revolución industrial en la provincia de Jaén. Esta investigación arroja luz sobre la que fue la primera máquina de vapor con óptimos resultados instalada en la provincia, siendo esta la máquina de vapor Cornish [1]. A partir de dicho trabajo se realizará un estudio más exhaustivo sobre esta maquinaria, su funcionamiento y sus partes más características, así como su ciclo termodinámico y un análisis mecánico a alguna de sus piezas más significativas.

Tras estos pasos previos, se construirá un prototipo de esta maquinaria, analizando las tecnologías utilizadas, así como los componentes que por distintas razones han sido adquiridos. Del mismo modo se analizarán las características de algunos de los materiales de fabricación utilizados.

Finalmente, y tras la obtención del modelo, se realizará un estudio de optimización de material empleado a una de sus piezas más significativas.

2. Antecedentes históricos de la máquina de vapor

En este primer capítulo se van a describir las máquinas de vapor más importantes previas al desarrollo de la maquina Cornish, así como sus mayores peculiaridades.

2.1 Primeras máquinas de vapor: Máquinas de Savery y Newcomen

Aunque es de creencia popular que la invención de la máquina de vapor es de James Watt, hubo antes que él varias patentes de máquinas que usaban la fuerza del vapor para realizar distintas tareas.

2.1.1. Thomas Savery

El inventor Thomas Savery fue el primero en lograr construir una maquina capaz de elevar agua y suministrar dicha maquinaria de forma pública haciendo uso del carbón como combustible de dicha máquina.

El agua se extraía por succión desde cierta altura debido a la presión mayor a una atmosfera por condensación de vapor en un recipiente cerrado. Este vapor pasaba por una tubería hasta llegar a un cilindro. En referencia a la imagen X, las válvulas A y B abiertas y C y D cerradas, la presión del vapor en el cilindro, puede empujar el agua que contiene el mismo, y bombearla de esta forma al exterior. Si posteriormente, cuando el cilindro está lleno de vapor, invertimos la apertura y cierre de las mencionadas válvulas, y se suministra agua fría al exterior del cilindro, el vapor contenido en él se condensará, cayendo precipitadamente su presión.

Este descenso de la presión, origina una diferencia de la misma entre el cilindro y el agua en la mina haciendo que esta suba por esa diferencia hacia el cilindro hasta rellenar una parte del mismo. En este punto comenzaría de nuevo el proceso mencionado, pudiendo de esta forma bombear agua de una mina. [2] [3]

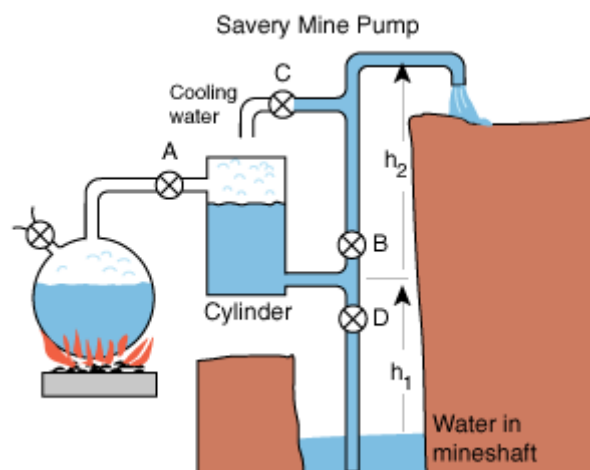


Ilustración 1. Esquema máquina Savery

2.1.2. Thomas Newcomen

Es incuestionable que Thomas Newcomen construyó la primera máquina de vapor practica para el desagüe de minas.

Esta máquina, también conocida como maquina atmosférica, introducía el vapor que se producía en una caldera, debajo de un cilindro que se encuentra abierto a la atmosfera en la parte superior, que contenía un embolo. Este embolo está conectado en la parte opuesta del balancín con un vástago, unidos ambos elementos por una cadena. El embolo realiza una carrera ascendente gracias a la acción del vapor. El fondo del cilindro está conectado con un tanque de agua que se haya por encima del

nivel del cilindro. Una vez se ha completado la carrera ascendente del pistón, una válvula que conecta el tanque con el cilindro se abre, echando un chorrito de agua al interior del cilindro. El vapor alojado en él, se condensa debido al contacto con el agua fría, creándose así un vacío en el cilindro, que propicia la carrera descendente del embolo. El agua resultante en el cilindro se desaoja mediante una tubería en el extremo inferior de este.

De esta forma la máquina de vapor de Thomas Newcomen ejercía su función y ayudaba a la extracción de agua de las minas por medio de una serie de bombas instaladas en el lado contiguo del balancín. [4]

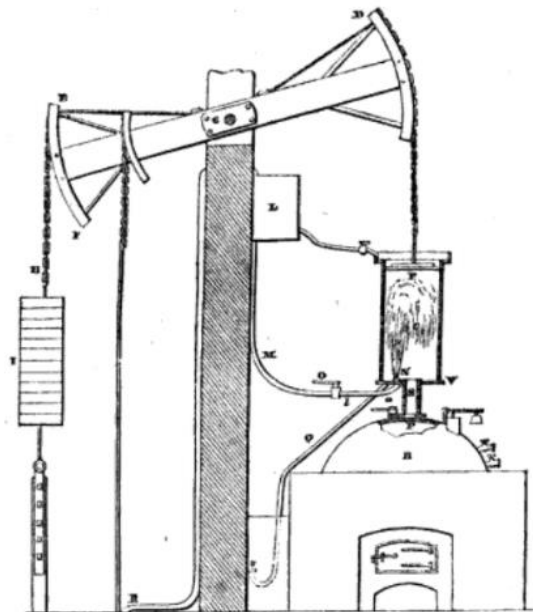


Ilustración 2. Esquema máquina Newcomen

2.2 Máquina de James Watt

James Watt, genio mecánico, interesado en las máquinas de vapor, inventadas por Thomas Savery y Thomas Newcomen, hizo sus propios adelantamientos sobre estas máquinas, llegando a obtener entre ocho y diez patentes por sus invenciones.

Entre las modificaciones e invenciones más importantes añadidas a la máquina de vapor se encuentra el condensador, ya que de este modo la condensación del vapor se llevaba a cabo en una cavidad distinta a la de la bomba o pistón. Para evitar que el condensador se llenase de aire y agua en poco tiempo, Watt también diseñó el acople de una bomba de aire para ayudar a la extracción del aire y agua retenidos en

el condensador. Otra de las grandes mejoras al modelo fue el uso del paralelogramo de Watt, siendo este un conjunto de barras diseñadas de tal medida y posición que ayudasen a que el movimiento del pistón fuese lo más verticalmente perfecto.

Otra de las grandes invenciones de James Watt fue la máquina de vapor de doble efecto, que como puede sugerir su nombre, inyectaba alternativamente vapor a un lado u otro del pistón.

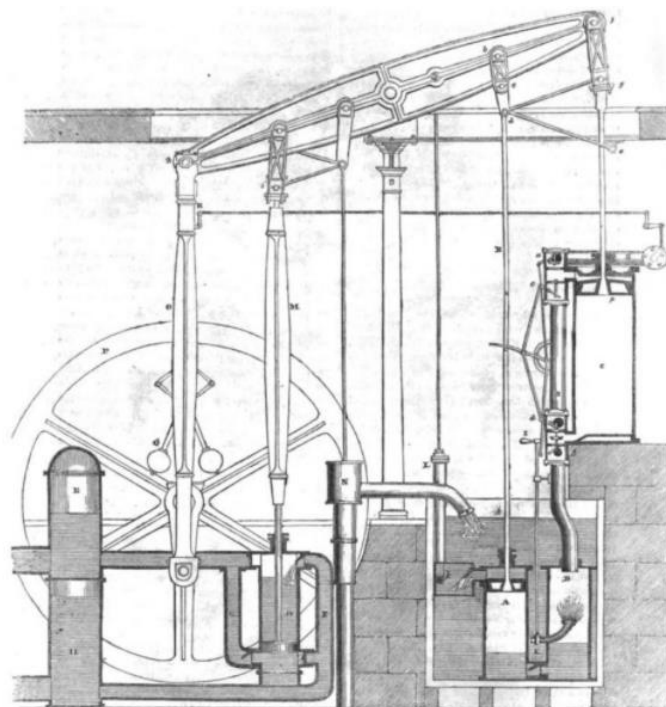


Ilustración 3. Esquema máquina Watt

Por último, la mejora del mecanismo biela-manivela para convertir movimiento rectilíneo alternativo en rotatorio en 1783, supuso un gran avance, dando lugar este motor a otras grandes invenciones de la época. [4] [5]

3. Máquina de vapor tipo Cornish

Las máquinas de vapor tipo Cornish surgen en Cornwall, Inglaterra, de donde proviene su nombre tal y como se puede observar. Su misión principal era la de bombear agua de las minas de la zona. La principal característica de este motor es el uso de vapor de alta presión, característica que se le atribuye al ingeniero Richard

Trevithick. Posteriormente Samuel Grose consiguió disminuir la pérdida de calor al aislar las tuberías, cilindros y calderas de estas máquinas. Sin embargo, lo que produjo un aumento en el rendimiento del motor fue el cierre de la válvula de admisión de vapor a mitad de carrera permitiendo la expansión del vapor hasta una presión más baja, mientras que en los motores diseñados por Watt el vapor era admitido a lo largo de toda la carrera con una presión no muy superior a una atmósfera o dos. [6]

Este tipo de máquina surge a partir del año 1800 cuando la patente de James Watt acaba y también surge debido al alto precio del carbón de la zona, hechos que propiciaron los cambios realizados en las primeras máquinas de vapor de Watt para aumentar el rendimiento de las mismas y así reducir la cantidad de carbón necesaria para el desagüe de las minas. [7] [8]

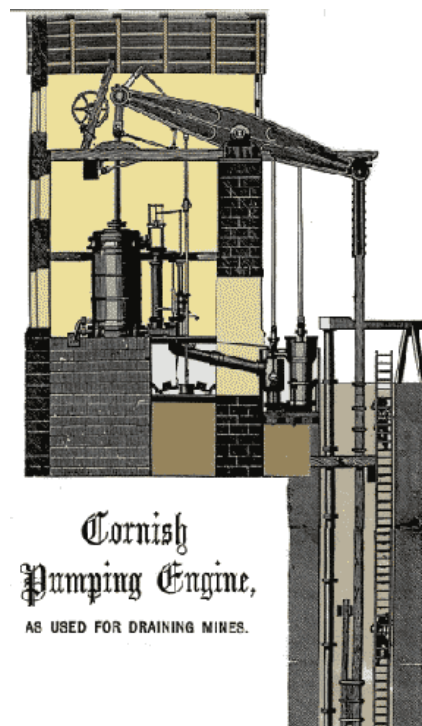


Ilustración 4. Esquema máquina Cornish

3.1 Principales diferencias entre la máquina Cornish y la de Boulton y Watt.

En este apartado se va a hacer una recopilación de las diferencias entre las máquinas Cornish y otras de acción simple. La mayor medida en que se lleva a cabo el principio de expansión del vapor. El uso de vapor a alta presión. La forma y las proporciones de la caldera y el horno. Lenta tasa de combustión. Las diferencias en

las disposiciones del condensador, el mayor tamaño de la tubería de educación hacia él y la posición de la bomba de aire. Por último, la economización del calor en todo lo posible durante todo su trayecto.

3.2 Características principales

3.2.1. Uso de vapor a alta presión

El uso de vapor a alta presión de manera expansiva, como se usaba en estas máquinas, proporciona una gran facilidad para la adaptación del trabajo que estas emplean para el bombeo. Este trabajo dependerá de la profundidad de la mina y la cantidad de agua a bombear.

La regulación de este trabajo se realiza mediante el empleo de un menor grado de expansión del vapor en el cilindro.

Sin embargo, la presión de vapor que introduce en el cilindro debe tener un límite, ya que la tensión que este produzca se comunica a través de la maquinaria y esta debería de ser de gran resistencia para superar la tendencia a la fractura que se causaría.

Cuando en los motores de Watt y Boulton se incrementó por primera vez la presión del vapor admitido al cilindro, y un mayor grado de expansión del vapor empezó a usarse, se comprobó como este hecho causaba grandes desperfectos y fracturas a la maquinaria. Las pruebas se llevaron a cabo en motores antiguos que, al haber estado originalmente calculadas para deformaciones ligeras, no fueron suficientemente fuertes para resistir la fuerza que se deriva de la nueva presión admitida. Los ingenieros de Cornwall consiguieron sin embargo la construcción de máquinas suficientemente resistentes a cierta presión de admisión de vapor en el cilindro. El incremento de presión conlleva maquinarias más costosas debido a la resistencia que estas debían tener, por tanto, dependiendo de la fuerza de bombeo necesaria en función de la mina se construían para una mayor o menor presión de vapor en orden de economizar la construcción de la maquinaria. [8]

3.2.2. Calderas

Las calderas son también una de las características más significativas de las maquinarias, ya que el arreglo que se les hizo cambia la forma tradicional del calentamiento del agua para la producción de vapor.

La corriente de gases calentada entra primero en la parte superior del tanque, sobre la cual se encuentra el agua más caliente, luego pasa a lo largo de unos conductos laterales encontrando superficies más frías que las anteriores, hasta llegar al fondo del tanque, donde siempre estará el agua más fría. De este modo la corriente a medida que se va enfriando gradualmente también actúa de forma gradual sobre el agua más fría, y por lo tanto se mejora la extracción del poder calórico libre que contenga el agua.

Las calderas estaban dispuestas en un edificio previsto para ellas, adyacente a la casa que albergaba el motor. La gran ventaja de esta separación del motor de la caldera es que impide que la maquinaria resulte dañada o desgastada indebidamente por el polvo producido por la combustión del combustible y de las cenizas. La casa de calderas estaba techada y poseía ventanas y puertas para mantener fuera el frío exterior. [8] [7]

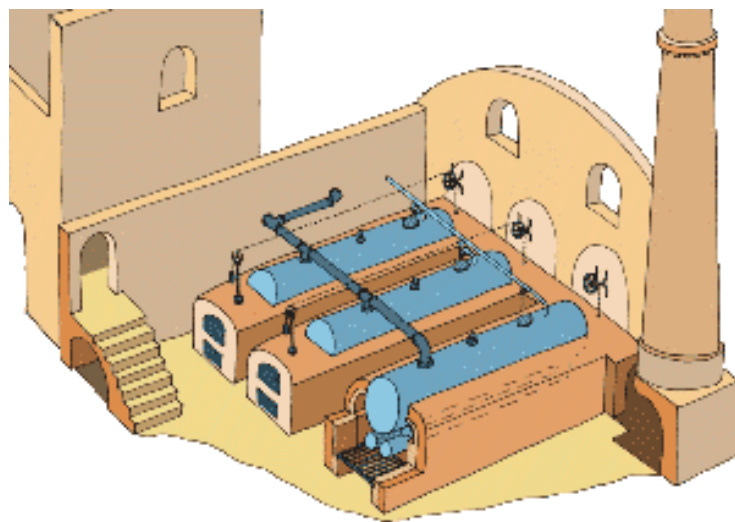


Ilustración 5. Casa de calderas Cornish

3.2.3. Condensación de vapor

Otras de las características más llamativas que encontramos en los motores de Cornwall, son las relacionadas con la condensación de vapor.

Así, encontramos que el diámetro de la tubería de educación, que transporta el vapor desde el cilindro al condensador, es mayor que en los motores diseñado previamente. Esto se debe a que de esta forma se facilita la expulsión del vapor desde el cilindro.

El emplazamiento del condensador también es distinto, ya que tradicionalmente este se encontraba dentro de las casas de bombeo. Sin embargo, en los motores Cornish se emplazó en la parte externa de la casa con el objeto de que este sea expuesto a la atmosfera exterior que está a menor temperatura que el interior y de este modo haciendo más eficiente la condensación. [8]

3.2.4. Economía

La característica más importante de la máquina de vapor tipo Cornish es su economía. A pesar de la potencia de la maquinaria y la universalidad de su aplicación, es la característica de su economía lo que la convierte en una máquina verdaderamente útil.

Las diversas modificaciones descritas anteriormente que se hicieron en la máquina de vapor en Cornwall produjeron una potencia a un coste menor debido al ahorro en carbón que dichas modificaciones suponían. Todo ello reside en el uso de vapor a alta presión con lo que se necesita menor cantidad de vapor para ejecutar el movimiento de la máquina y la mejora de las calderas, que hacían más efectiva la producción de vapor. [8]

A: Pieza de retención

B: Bloques

C: Viga principal

D: Puerto superior

F: Cilindro

G: Gobernador de la catarata

H: Tubería conectada al cilindro desde las calderas

J: Tubo de educación

L: Condensador

M: Tubería de equilibrio

N: Bomba de aire

O: Puerto inferior

P: Bomba de alimentación del émbolo

R: Vástago

Se describen a continuación los elementos principales más característicos:

4.1. Cilindro

El cilindro de la máquina de vapor descrita tiene un diámetro interno de 70 pulgadas cuya longitud permite una carrera de pistón de 10 pies. Se coloca sobre un gran bloque de piedra atornillado con cuatro pernos a este.

El cilindro posee una carcasa de hierro fundido cuyo diámetro permite una separación con este de una pulgada. Este espacio está destinado a alojar constantemente vapor proveniente de las calderas a través de una tubería con un

diámetro de 4 pulgadas. El vapor que ocupa este espacio permite que la temperatura y la presión en el interior del cilindro no disminuyan en exceso por la gran diferencia entre la temperatura del ambiente y la del vapor interior.

Esta carcasa también evita las pérdidas por condensación del vapor en la pared del cilindro y ayuda a la evaporación de cualquier residuo de agua que pudiese venir a través de las tuberías de la caldera hacia el cilindro. Por otra parte, permite que el vapor interior tienda a mantener una temperatura equilibrada previniendo los efectos negativos de una expansión de vapor desequilibrada.

Por otra parte, el agua que puede producirse por condensación en interior del espacio entre la carcasa y el cilindro, puede volver a las calderas a través de una tubería, aprovechando en este punto la temperatura del agua condensada, siendo esto un caso de ahorro.

Con el fin de evitar pérdidas de calor del cilindro y su correspondiente carcasa hacia el exterior, el conjunto se rodea con una capa de ladrillo, dejando una cavidad de aire entre ambos. A continuación, habrá una capa de material aislante y por ultimo una cubierta de madera. Esta disposición varia en las diferentes maquinas, según el ingeniero que lo proyectase.

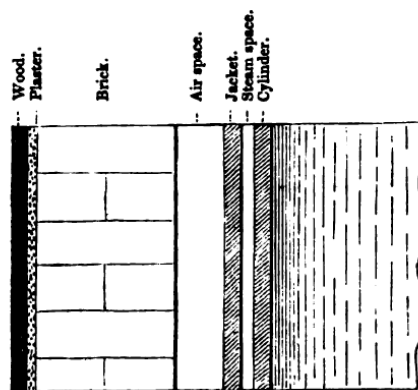


Ilustración 7. Recubrimiento del cilindro

Esta carcasa en general permite que la temperatura exterior colindante a ella, no exceda de 70 a 80 grados centígrados, y que la atmosfera del interior de la casa que alberga la maquina esté por encima solo unos grados del ambiente exterior.

El cilindro también posee una cubierta o tapa superior especial para también evitar las pérdidas de calor por la parte superior. En esta cubierta se encuentra una pequeña cámara formada por dos anillos de latón separados entre sí por pequeñas piezas. En esta cámara se admite vapor por una pequeña tubería que conecta con la carcasa del cilindro, y está destinada a prevenir cualquier fuga de aire en el cilindro. Esta cubierta fue invención de Jonathan Hornblower, aplicada en su máquina de doble cilindro. [8]



Ilustración 8. Cilindro

4.2. Pistón

El pistón se hacía con hierro fundido y con un espesor considerable, haciéndolo con mucho cuidado para que su acabado tuviese un diámetro uniforme y fuese perfectamente cilíndrico. Lo más importante en el pistón es que este en perfecto contacto con el cilindro, para que entre ellos no pueda fluir en ningún momento vapor, sin embargo, en ese contacto, la fricción no debe incrementarse innecesariamente por la presión ejercida contra los lados, con objeto de no deteriorar el pistón ni el cilindro con dicha fricción. Para este propósito, se solía hacer una ranura profunda en el disco del pistón y se insertaba cáñamo bien lubricado como relleno en dicha ranura.

Los pistones fueron evolucionando con el tiempo hasta incluso no necesitar el relleno de cáñamo en la ranura del cilindro del pistón. [8]

4.3. Movimiento paralelo

El movimiento paralelo es invención de James Watt, objeto de este mecanismo es la transmisión de movimiento vertical al pistón, evitando una tensión lateral significativa en él. Este mecanismo permite la transmisión en ambos sentidos, lo que casi duplica la potencia con respecto a la máquina atmosférica de Newcomen, en el que el movimiento se transmitía a través de una cadena que no permitía la transmisión de movimiento en dos sentidos. [8]

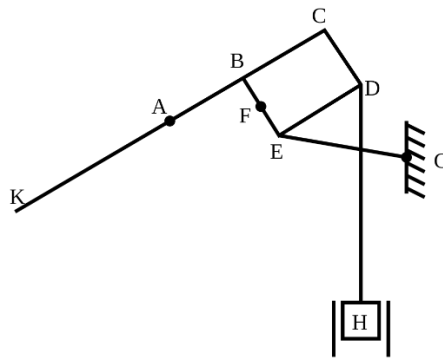


Ilustración 9. Movimiento paralelo de Watt

4.4. Balancín

El balancín está fundido en dos placas como suele hacerse en las grandes máquinas, que se atornillan entre sí con bloques de distancia para mantenerlos paralelos. El extremo que está unido al pistón, es generalmente más largo en los motores Cornish que el extremo que está unido al vástago principal, dando un apalancamiento de aproximadamente 10: 8 o 9, a favor del pistón. El extremo interno mide 16 pies 6 pulgadas de largo, y el extremo exterior 13 pies 3 pulgadas de largo, dando aproximadamente un apalancamiento de 10: 8. Se deduce de esto, que la carrera del pistón es de 10 pies y la del vástago principal será de 8 pies. El objeto de esta diferencia de medidas, es la diferente velocidad entre el pistón y el vástago principal, siendo esta una ventaja en el trabajo de ambos elementos. El primer balancín adoptado a estas medidas fue instalado en 1767 para “*the New River Company*”.



Ilustración 10. Balancín tipo Cornish

4.5. Pieza de retención

En la parte superior del balancín, se encuentran dos barras de hierro unidas creando la llamada pieza de retención. Dicha pieza era utilizada para evitar una carrera de pistón demasiado larga y evitar así daños o desperfectos causados por un aumento del vapor admitido, o vapor con más presión de la debida en el cilindro o en algunos casos un desprendimiento accidental de la parte del contrapeso por rotura de un vástago de bomba o similar.

La colocación y dimensiones de esta pieza permitían que estas barras tocasen unos bloques, fijados en la parte superior de la casa que albergaba la máquina, impidiendo de esta forma el desplazamiento adicional que se pudiese producir. El sonido producido por el choque de estas piezas con los bloques, avisaban a los operarios de que habría que regular la presión del vapor o la cantidad de vapor admitido por la válvula de admisión.

En algunos casos se colocaba una campanilla en cierta posición tal que la pieza de retención chocase un poco antes con dicha campanilla que, con los bloques fijado, pudiéndose llevar la atención a la admisión de vapor con anterioridad para evitar los daños causados a la pieza de retención con el choque a los bloques. [8]

4.6. Puerto superior

Esta cavidad alberga el sistema de válvulas que permiten la entrada de vapor al cilindro, así como la regulación del mismo.

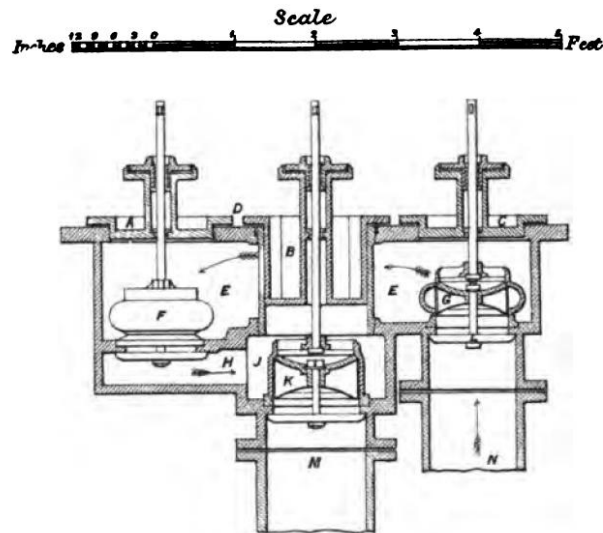


Ilustración 11. Puerto superior de válvulas

En la ilustración anterior se muestran los siguientes elementos:

A, B y C: Cubiertas

D: Boquilla superior

E: Cámara de vapor

F: Válvula de vapor.

G: Válvula de regulación

H: Paso (el vapor atraviesa este paso cuando la válvula de vapor (F) y la de regulación (G) están abiertas).

J: Puerto de vapor

K: Válvula de equilibrio, situada en la mitad de la boquilla

M: Tubería de equilibrio

N: Tubería de admisión de vapor desde las calderas

Válvula de regulación (G). Con esta válvula se controla la admisión de vapor en la cámara E-E de donde después pasa a través de la válvula V2 hacia el cilindro. La apertura de la válvula reguladora es constante durante el funcionamiento de la máquina y es regulada manualmente y no por la acción de la misma máquina. El propósito de la regulación de esta válvula es mantener la presión media efectiva del vapor que se admite en cilindro constante en todo momento, aunque la presión del vapor emitido por las calderas pueda variar.

La apertura de la válvula se regulaba a través de una manivela situada al alcance de los operarios, y que estaba conectada por una varilla y una palanca al tallo de la válvula. La varilla tenía un tornillo micrométrico, unido a la palanca, que cuando se giraba la manivela mencionada a la que estaba conectada, elevaba o bajaba la válvula regulando así el vapor admitido a la cámara.

Válvula de vapor (F). Con esta válvula se admite el vapor al cilindro. Cuando esta se abre (suponemos abierta también la válvula de regulación descrita anteriormente) el vapor atraviesa la cámara E-E, pasando por esta válvula hacia el puerto de vapor J, que está conectado con la parte superior del cilindro. Inmediatamente el pistón comienza a descender por la acción del vapor y comienza su carrera descendente. Cuando el pistón ha recorrido parte de su carrera, la válvula se cierra y de esta forma la comunicación con el vapor procedente de la caldera se corta. El resto de la carrera se realiza con la expansión del vapor admitido.

La apertura y cierre de esta válvula junto con la válvula de equilibrio y la de agotamiento, serán descritas en otro apartado.

Válvula de equilibrio (K). Esta válvula abre la comunicación entre los espacios por encima y por debajo del pistón en el cilindro cuando este ha realizado su carrera descendente. Debido a la diferencia de presión entre ambos espacios, el vapor que se encuentra en la parte superior del cilindro, pasa a través del tubo de equilibrio hasta que se reestablezca una presión equilibrada en la totalidad de las cavidades puestas en contacto. Por tanto, la presión en la parte superior del pistón desciende, y debido al peso del vástago principal, este es libre de ser arrastrado hacia arriba. [8] [9]

4.7. Puerto inferior

Sistema de válvulas

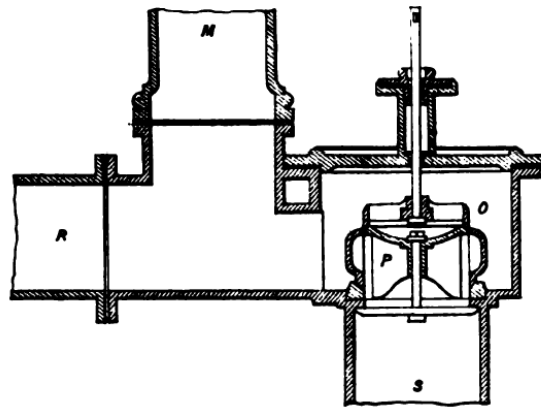


Ilustración 12. Puerto inferior de válvulas

M: Tubería de equilibrio

O: Puerto inferior

P: Válvula de agotamiento

R: Tubería de conexión con la parte inferior del cilindro

S: Tubería de educción

Válvula de agotamiento (P). Su uso está destinado a abrir o cerrar la comunicación entre la parte inferior del cilindro y la tubería de equilibrio con el condensador. De este modo, cuando esta válvula se abre, el vapor por diferencia de presión, atraviesa la tubería de educción hasta el condensador formándose así vacío en la parte inferior del pistón. [9] [8]

4.8. Sección y construcción de las válvulas

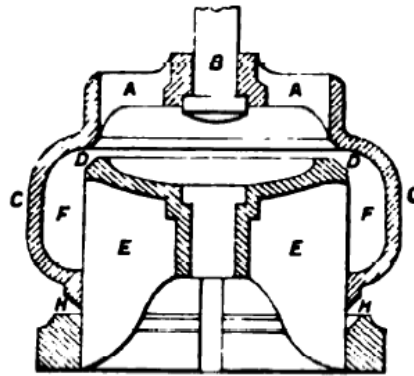


Ilustración 13. Sección de válvula

A: Brazos

B: Varilla de accionamiento

C: Carcasa de válvula acampanada, que se acciona mediante la varilla B. Esta es la única parte móvil de la válvula

D: Anillo de empaque superior

E: Asiento de la válvula, que está fijado a la cámara que alberga dichas válvulas.

H: Anillo de empaque inferior

Las válvulas de vapor y regulador tienen 10,5 pulgadas de diámetro, pero la válvula de agotamiento tiene 15 pulgadas. La válvula de equilibrio tiene 12,5 pulgadas de diámetro.

Estas válvulas están diseñadas para dar una gran extensión de apertura para el paso del vapor, con poco recorrido, siendo necesaria tan solo una pequeña cantidad de energía para hacerlas funcionar. [8] [9]

4.9. Catarata

Este es uno de los elementos más característicos de los motores tipo Cornish. Este elemento aparece por primera vez en las máquinas de vapor de Newcomen en Cornwall, aunque se desconoce el autor de estas primeras cataratas. Más tarde

Boulton y Watt desarrollaron estas cataratas hasta la que es usada en los motores Cornish.

El uso de este ingenioso dispositivo, es regular el periodo de apertura de las válvulas de vapor y de agotamiento y, por lo tanto, determinar el intervalo entre las carreras sucesivas del motor, cuya velocidad y duración determinará la cantidad de agua que se podría extraer de la mina.

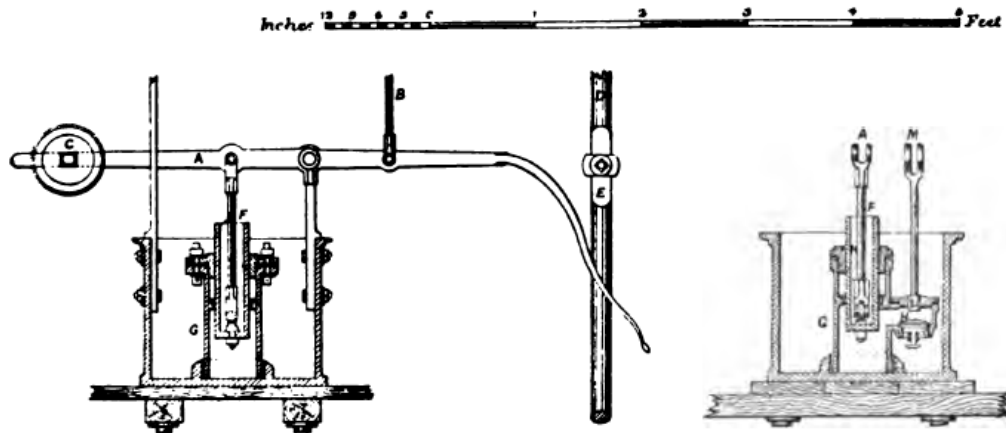


Ilustración 14. Esquema de la catarata

A: Palanca principal

B: Barra

C: Pesa

D: Barra de conexión

E: "Alzaválvulas"

F: Émbolo

G: Tanque de agua

H: Válvula de admisión

M: Palanca conectada al tapón de regulación (L)

Esta catarata consiste en una bomba situada en una cavidad circular rellena de agua emplazada por debajo del nivel del cilindro de la máquina. El agua alcanza el

tanque a través de la válvula de admisión, que se abre libremente permitiendo la entrada de flujo de agua pero que no permite la salida del mismo debido a la colocación de un tapón móvil.

El émbolo está conectado a la palanca por una unión. Esta palanca posee en uno de sus extremos una pesa, y en el otro extremo la palanca se proyecta terminando en el mango que se muestra en la figura.

Cuando la barra de conexión desciende cerca del final de su carrera, el alzaválvulas golpea la palanca y en consecuencia el embolo se eleva, de esta forma el agua a través de la válvula de admisión fluye libremente hacia el tanque, siguiendo al embolo en su ascenso.

Después de completarse la carrera descendente del pistón, este comienza a ascender (debido a la apertura de la válvula de equilibrio). Por tanto, la barra de conexión asciende a la vez, dejando de golpear la palanca, que se había elevado por el extremo donde descansa la pesa por la acción de esta barra de conexión. El descenso de la pesa y la palanca se convierten en la fuerza motriz para impulsar el agua de la bomba, forzando el émbolo hacia abajo. De esta forma, y habiéndose cerrado la válvula de admisión, el único paso para el agua es por la abertura dejada alrededor del tapón de regulación. El tiempo de descenso del embolo, depende por tanto del tamaño de esta abertura.

En el extremo del mango de la palanca, hay una barra unida a ella que asciende de forma vertical. Esta barra es la encargada de abrir en primer lugar la válvula de agotamiento de la máquina y posteriormente la válvula de vapor, de esta forma provoca que el motor realice su siguiente carrera. Esta barra actúa sobre un pestillo que libera pesas que por la acción de su caída abren las válvulas. La brusquedad de la acción de las pesas se considera como una gran ventaja, sobretodo en la apertura de la válvula de admisión, evitándose pérdidas por el contacto del vapor con la válvula.

Por tanto, el intervalo de tiempo entre dos carreras consecutivas depende del tiempo que tarda el embolo de la catarata en descender, que a su vez depende de la abertura dada al tapón de regulación. Esta abertura se regula mediante un tornillo

micrométrico y mango conectado al tapón de regulación por una palanca, que puede regular este tapón a cualquier grado de apertura.

Gracias a la acción de la catarata, la apertura de las válvulas de agotamiento y de vapor pueden regularse para un determinado número de aperturas, dando lugar a ciertas carreras del pistón por minuto y determinándose así la cantidad de agua desalojada de la mina. [8] [9]

4.10. Tubo de Educción

Este tubo se extiende desde la parte baja del puerto inferior, que alberga la válvula de agotamiento, hasta el condensador.

Tradicionalmente esta tubería poseía el mismo tamaño que la tubería de equilibrio, sin embargo, en las maquinas Cornish, esta es mucho más larga que la mencionada anteriormente. El área de la misma es el doble que el de la tubería de equilibrio, siendo su diámetro de 17 pulgadas y el de la tubería de equilibrio de 12 pulgadas.

El aumento de área y diámetro con respecto a la tubería de equilibrio se debe a que de esta manera el vapor tiene mayor facilidad para pasar a través de ella desde el cilindro y análogamente se puede proporcionar un mayor espacio de vacío.

La tubería de educción pasa a través de la pared de la casa que alberga la máquina, por debajo del centro del balancín hasta la cisterna del condensador. [8]

4.11. Condensador

El condensador tiene 2 pies 9 pulgadas de diámetro. Este posee un grifo de inyección, que se acciona por medio de una barra con un mango, que permanece abierto durante el funcionamiento de la máquina, y que se utiliza para regular el tamaño del chorro lanzado al condensador. Este chorro de agua no es continuo durante todo el tiempo que la maquina está funcionando, ya que se apaga durante la carrera ascendente del pistón por medio de una válvula.

Esta válvula está conectada por unas palancas y unas varillas con la varilla que acciona la válvula de agotamiento, por tanto, la inyección de agua sobre el

condensador se abre o se cierra a la vez que dicha válvula. Esta válvula se abre justo en el momento en el que el vapor se precipita hacia el condensador desde el cilindro y continúa abierta hasta que el pistón termina su carrera descendente, momento en el que esta válvula y la válvula de agotamiento se cierran a la vez.

El condensador está emplazado en la parte externa de la casa Cornish, tradicionalmente se emplazaba dentro. Esta nueva situación para el condensador permite un mayor espacio para la catarata y otras partes de la maquina en el interior de la casa. Otra de las ventajas es que de esta forma el condensador se ve expuesto a la atmosfera exterior, manteniéndose a menor temperatura que si estuviese emplazado dentro, haciendo más eficiente la condensación. [8]



Ilustración 15. Condensador y bomba de aire

4.12. Bomba de aire

La función principal de la bomba de aire es crear vacío en la tubería de educación y expulsar el agua condensada en el condensador.

La bomba de aire tiene un diámetro de 2 pies 9 pulgadas, tiene una carrera de 5 pies, la mitad de la del pistón

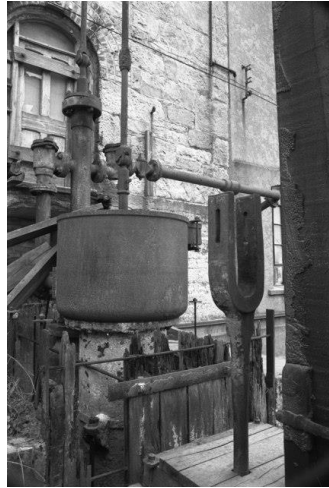


Ilustración 16. Bomba de aire

4.13. Vástago

El vástago principal se fabricaba con madera de Memel, antigua región perteneciente a Prusia, perfectamente recta y sin nudos o fallas, como los que se usan para los mástiles de los buques. La parte superior del vástago se cuelga al pasador en el extremo exterior de la viga principal por correas de hierro forjado. La parte superior está asegurada por placas de hierro, una en cada cara del vástago, y atornilladas a través de la madera. Para las minas o pozos muy profundos, la parte superior del vástago a veces se compone de dos piezas largas situadas la una a continuación de la otra.

A intervalos a través de la mina, se atan unas piezas laterales llamadas alas al vástago como prevención de daños por el descuelgue de la misma en caso de fractura de esta. En las zonas inferiores colindantes a estas piezas, se construyen unos bloques en el pozo para que, en caso de fractura, el vástago gracias a estas piezas laterales descansa sobre estos bloques evitando grandes daños en la mina. De forma análoga estos bloques y las alas del vástago también previenen una carrera demasiado larga y los daños añadidos sobre el resto de la maquinaria que ello conllevaría.



Ilustración 17. Vástago

La dirección del vástago se guía a intervalos por marcos fijados en los laterales del pozo, que están revestidos de madera muy dura y bien engrasada para prevenir el desgaste del vástago por la fricción ejercida.

La unión a la viga principal de la maquina se realiza sin la intervención de un movimiento paralelo, simplemente se guía con los marcos mencionados anteriormente. La consecuencia más visible es la desviación de su movimiento de una línea vertical en la parte superior del vástago, aunque esta desviación es mucho menor en la zona inferior de él. Sería mucho más ventajoso para el vástago que en su unión interviniese un movimiento paralelo para asegurar su posición vertical en su ascenso y descenso. [8]

Se ha calculado a partir de relaciones trigonométricas la desviación que sufriría el vástago en la parte superior del mismo teniendo en cuenta la carrera de este y la distancia de su posición hasta el eje de la viga principal que es de 13 pies y 3 pulgadas.

Tomando como referencia dicha distancia y la mitad de la carrera, se puede construir un triángulo rectángulo del cual se obtiene la mitad del ángulo que completa cada carrera el balancín en su recorrido.

$$\tan \varphi = \frac{4 \text{ ft}}{13 \text{ ft } 3''} = 0,30074$$

$$\varphi = \arctan \varphi = 16,74^\circ$$

Teniendo en cuenta dicho ángulo y la posición superior o inferior del balancín, se puede obtener la distancia horizontal al eje en dicho momento y así hallar la desviación que sufre el vástago.

$$\text{sen } 16,74^\circ = \frac{x}{13,3 \text{ ft}}$$

$$x = 12,68 \text{ ft}$$

$$13,3 - 12,68 = 0,62 \text{ ft} = 0,189 \text{ m}$$

Por tanto, la desviación en la parte superior del vástago es de 18,9 cm que teniendo en cuenta las dimensiones de la maquinaria, podemos entender la supresión de un movimiento paralelo por parte de los ingenieros constructores.

5. Principio de funcionamiento

Una vez se ha explicado cada elemento principal de la maquinaria por separado, se va a proceder a la explicación del funcionamiento del conjunto. Para ello, los diferentes movimientos de la maquinaria resultantes de la carrera en direcciones ascendente y descendente del pistón se van a denominar golpes o recorridos internos y externos, ya que así se denominaban en Cornwall de donde es originaria la máquina. El golpe recorrido interno se da cuando el pistón del cilindro realiza su carrera descendente, y cuando este invierte la dirección de su movimiento y asciende, se trata de un golpe o recorrido externo. Esta denominación tiene su origen en que parte de la maquinaria se encuentra situada en el interior de la casa de bombeo y parte de ella queda fuera de esta casa.

5.1 Recorrido interno

Se supone la maquinaria en el punto de comienzo de su carrera descendente, es decir con el pistón en reposo en la parte superior del cilindro y con la generación de vacío por debajo del mismo.

Estando la válvula de regulación abierta con una apertura fija, regulada manualmente por la su manivela por los operarios, el puerto superior comienza a llenarse con vapor elástico procedente de las calderas.

A partir de las suposiciones anteriores, la válvula de vapor se abre, y el vapor atraviesa el puerto superior hasta alcanzar la parte superior del cilindro y, en consecuencia, el pistón comienza lentamente su descenso, el vapor continúa fluyendo hacia el cilindro mientras la válvula de vapor permanezca abierta.

Una vez ha entrado la cantidad de vapor suficiente, que dependerá de la presión a la que este se encuentre y su poder de expansión, esta válvula se cierra evitando cualquier entrada de vapor adicional en el cilindro. De esta forma, la comunicación entre el cilindro y la caldera se corta. El vapor continúa ejerciendo presión sobre el pistón por su propia fuerza y comienza a expandirse, aumentando su volumen y disminuyendo su presión. A medida que esto ocurre, la fuerza ejercida por el pistón comienza a asemejarse a la resistencia al movimiento de este ejercida por el vástago principal y el conjunto de bombas asociadas al mismo. En este punto, el pistón es capaz de vencer la resistencia al movimiento debido a la energía cinética que en este punto tiene el pistón. Esta energía se gasta por tanto en vencer la resistencia y por ello comienza a frenar su velocidad descendente hasta llegar al final de la carrera. La energía cinética acumulada se debe al excedente de la misma al comienzo de la carrera. El cierre de la válvula de vapor esta accionado por la catarata, se regula de esta forma la cantidad de vapor que se introduce en el cilindro.

La longitud de la carrera del pistón dependerá por tanto de la presión del vapor suministrado siendo esta más larga si la presión del mismo procedente de las calderas se ve aumentada. Cuando se introduce vapor con un exceso de presión, el pistón realiza una carrera más larga de lo habitual y la llamada pieza de retención golpea los bloques colocados, advirtiéndolo al asistente del exceso de presión. Este exceso se puede solucionar de diversas formas. Una de ellas es disminuir la apertura de la válvula de regulación y otra sería regular el cierre de la válvula de vapor a través de la catarata.

Si por el contrario la presión en la caldera disminuye y, por consiguiente, la carrera se hace demasiado corta, la válvula de agotamiento no se cierra, y como consecuencia la válvula de equilibrio no puede abrirse y los operarios son advertidos de este hecho al comprobar que la maquinaria no puede trabajar. También se puede solucionar este problema de la misma forma que se soluciona el exceso de vapor. [8]

5.2 Recorrido externo

Cuando carrera descendente está llegando a su final y el pistón ha descendido casi hasta el fondo de su recorrido, un empujador presiona una empuñadura inferior, conectada a los puertos de las válvulas, y realiza así tres operaciones. En primer lugar, ejecuta el cierre de la válvula de agotamiento que se ha mantenido abierta durante todo el recorrido del pistón. En segundo lugar, cierra la válvula de inyección y detiene la entrada de agua en el condensador. Y en tercer y último lugar, abre la válvula de equilibrio. En algunas ocasiones la válvula de equilibrio se abre mediante la adición de una nueva catarata, como ejemplo la maquina Cornish en "Old Ford". Este hecho sin embargo no era algo común.

La apertura de la válvula de equilibrio pone en comunicación la parte superior e inferior del cilindro y en consecuencia la presión a cada lado del pistón tiende a igualarse y entrar en equilibrio, de ahí el nombre de dicha válvula y de la tubería de equilibrio. Debido por tanto al cambio de presión en la parte superior al cilindro, esta presión ya no puede vencer la resistencia ejercida por el vástago y las bombas y por ello el pistón se desplaza en dirección ascendente.

Durante el ascenso del pistón, el vapor pasa gradualmente de la parte superior a la parte inferior del cilindro, a través de la válvula de equilibrio, y llena el vacío que deja el pistón tras de él. Cerca del final de esta carrera ascendente, una varilla acciona de nuevo la válvula de equilibrio y esta se cierra para el comienzo de una nueva carrera descendente.

En el mismo periodo mencionado anteriormente, el vapor se precipita al condensador, generando un vacío debajo del pistón. La precipitación del vapor hacia el condensador se consigue con la ayuda de la bomba de aire situada contiguamente al condensador, ya que esta propicia el vacío necesario.

Por otra parte, esta carrera descendente del pistón, produce la carrera ascendente del vástago principal de la maquinaria que lleva acopladas una serie de bombas para ejecutar la principal misión de la maquinaria, la extracción de agua de la mina.

Estas bombas llevan acoplados una serie de émbolos que, en la carrera ascendente del vástago, son capaces de succionar agua de la mina. Para que la extracción de esta cantidad de agua sea completa, existen unas válvulas antirretorno que imposibilitan la devolución de agua a la mina. En la carrera descendente del vástago, el embolo presiona el agua succionada y al encontrarse con las válvulas antirretorno, esta agua encuentra su camino en una tubería que también tiene una válvula, que la deriva de forma ascendente hacia un deposito superior. Este conjunto de embolo, válvulas y tuberías se denomina bomba aspirante e impelente.

Los depósitos solían estar separados entre 30 y 40 metros, aunque era muy común encontrarlos separados de 70 u 80 metros. En el fondo del pozo se excavaba un foso de 5 a 10 metros donde se acumulaba el agua. [8] [7]

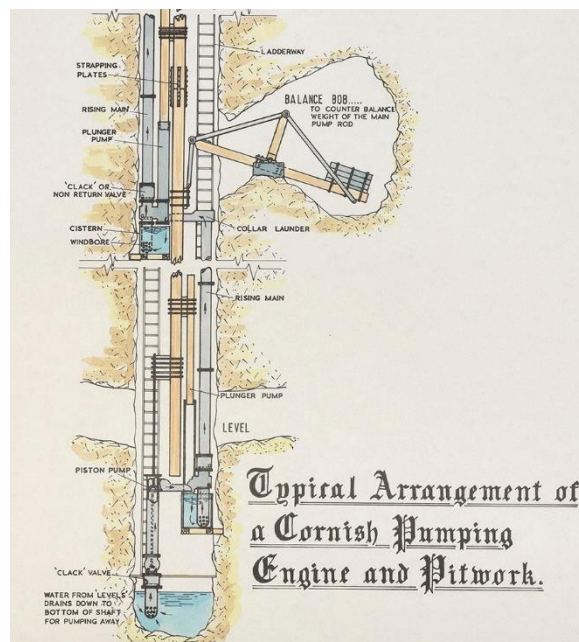


Ilustración 18. Esquema bombas y depósitos de agua

5.3 Ciclo termodinámico de la máquina

Debido a las peculiares características de admisión de vapor en la máquina de vapor Cornish, se puede determinar que se producen dos ciclos termodinámicos simultáneamente, uno en la cara superior del pistón y otro en la cara inferior del mismo. Considerando que la variación del volumen en cada cara es la misma, estos ciclos se pueden superponer y formar el siguiente ciclo termodinámico teórico:

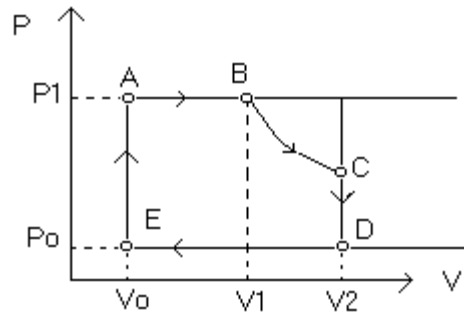


Ilustración 19. Ciclo teórico general

Sin embargo, se analizará cada ciclo termodinámico por separado para tener una mejor visión de cómo el vapor ejerce su función dentro del cilindro. Para ilustrar estos ciclos tenemos la siguiente figura

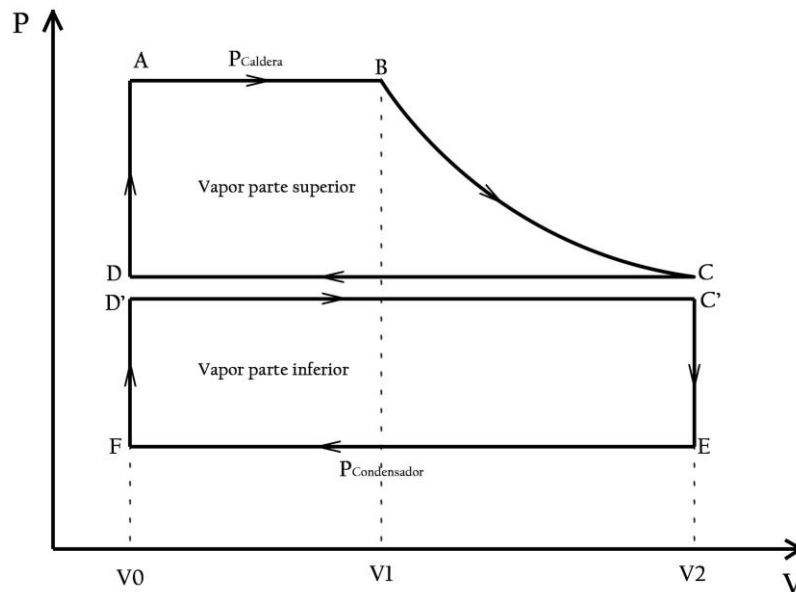


Ilustración 20. Ciclo teórico maquina Cornish

- V0: Mínimo volumen de vapor en cada cámara
- V1: Cantidad de volumen de vapor en la cámara superior a la que se corta la admisión del mismo desde la caldera
- V2: Máximo volumen de vapor que se puede alcanzar en cada cámara

5.3.1. Descripción del ciclo

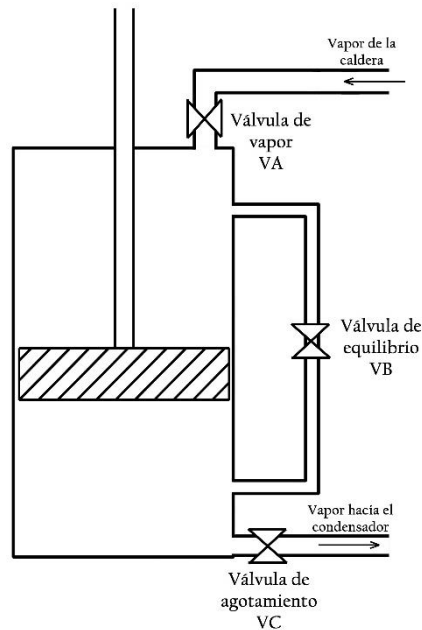


Ilustración 21. Esquema simplificado del sistema de válvulas

Comenzaremos la descripción del ciclo termodinámico en el punto A para la cavidad superior y simultáneamente en el punto E para la cavidad inferior. En estos puntos del ciclo termodinámico tenemos la válvula de admisión de vapor VA abierta, la válvula de equilibrio VB cerrada y la válvula de agotamiento VC abierta. En la cámara superior del cilindro tiene lugar por tanto la transformación A-B, en la que se admite vapor proveniente de las calderas al cilindro a presión constante (P_{caldera}). Sin embargo, en la cámara inferior el vapor está saliendo del cilindro hacia el condensador a presión constante ($P_{\text{condensador}}$) siendo ésta la transformación E-G.

Al llegar al punto B del ciclo termodinámico, la válvula de admisión de vapor VA se cierra provocando la expansión del vapor de la cámara superior de forma adiabática mientras el pistón continúa su carrera descendente, transformación B-C. El resto de válvulas permanecen en la misma posición (VB cerrada y VC abierta). En la parte inferior del cilindro sigue saliendo vapor a $P_{\text{condensador}}$ ya que la válvula de agotamiento sigue abierta, transformación G-F.

Una vez el pistón ha descendido por completo, se abre la válvula de equilibrio VB y se cierra la válvula de agotamiento VC mientras la válvula VA se mantiene

cerrada. Esto sucede en los puntos C y F respectivamente. Se equilibran las presiones de ambas cámaras por el cambio de posición de estas válvulas, provocando una subida instantánea de la presión en la parte inferior del cilindro hasta alcanzar la presión de la cámara superior P_{media} , en la cámara superior la presión se mantiene ya que esta es mucho mayor, transformación F-D' del ciclo de la cavidad inferior y punto C en el ciclo de la cavidad superior.

Una vez ambas cámaras se encuentren conectadas por la apertura de la válvula de equilibrio, la subida de presión en la cámara inferior provoca que el pistón comience a subir mientras VA y VC se mantienen cerradas, transformación C-D y D'-C'. El pistón se eleva durante su carrera ascendente y la cámara superior va disminuyendo su volumen a presión constante, desalojando el vapor de la cámara superior que pasa hacia la cámara inferior del cilindro. En la cámara inferior, el volumen aumenta hasta V_2 .

Al llegar a los puntos D y C', se cierra la válvula de equilibrio VB y se abre la admisión de vapor a través de la válvula VA y simultáneamente la válvula de agotamiento VC, lo que provoca un aumento instantáneo de la presión del vapor de la parte superior del cilindro hasta la $P_{caldera}$, transformación D-A. En la parte inferior del cilindro, al abrir VC la presión cae instantáneamente hasta la $P_{condensador}$ (transformación C'-E).

5.3.2. Análisis del ciclo

Tras la descripción del ciclo termodinámico, se procede al análisis del mismo teniendo en cuenta el trabajo y el calor en cada tramo. Para este análisis, en primer lugar, debemos aportar la información necesaria de cada punto del ciclo, así como sus propiedades termodinámicas principales.

Todos los datos iniciales que se aportan se han extraído de la fuente "*A Treatise of the Cornish Pumping Engine*" [8]

En primer lugar, se calculan los volúmenes principales del ciclo, descritos anteriormente. Para ello, tenemos en cuenta el valor V_0 aportado como dato, así como el diámetro del cilindro, la longitud de carrera del pistón y la longitud del mismo que recorre antes del cierre de la válvula de admisión.

Datos	V0 (ft ³)	D _{Cilindro} (inch)	L _{Carrera} (ft)	L _{Cierre} (ft)
	18	80,25	10	3,13
Datos SI	V0 (m ³)	D _{Cilindro} (m)	L _{Carrera} (m)	L _{Cierre} (m)
	0,5097	2,038	3,048	0,954

Tabla 1. Datos iniciales

Con dichos datos podemos calcular el valor de V1 y V2 haciendo uso de las siguientes expresiones:

$$V1 = \frac{\pi \cdot D_{Cilindro}^2}{4} \cdot L_{cierre} + V0$$

$$V2 = \frac{\pi \cdot D_{Cilindro}^2}{4} \cdot L_{carrera} + V0$$

Sustituyendo los datos aportados en las expresiones anteriores obtenemos:

V0	0,5097 m ³
V1	3,6227 m ³
V2	10,4557 m ³

Tabla 2. Volúmenes principales

Con los datos anteriormente calculados, y teniendo en cuenta que la presión del vapor procedente de la caldera se va a tomar como 45 libras por pulgada cuadrada, ya que era la presión más usual para este tipo de maquinarias, podemos proceder al cálculo de propiedades de todos los puntos del ciclo termodinámico.

Para dicho cálculo, se va a usar la herramienta TermoGraf, simulador termodinámico que nos permite el cálculo de propiedades dibujando los estados, procesos y ciclos directamente sobre el diagrama termodinámico y con opción a la modificación de algunos parámetros para obtener el estado deseado.

Estado A

Al no hallarse dato alguno sobre el recalentamiento del vapor evaporado en las calderas, consideramos dicho vapor en estado de saturación, lo cual sitúa al correspondiente estado A sobre la campana de Andrews. Este hecho es una de las características principales para la obtención de los valores correspondientes a este estado. Otra de las características principales de este estado es su presión ($P_{caldera}=45$ psi=3,1 bar).

Con la aportación de la presión ($P_A = 3,1 \text{ bar}$) y el título de vapor ($X = 1$) al programa, se obtienen todas las propiedades del estado (ver ilustración...).

Proc.---		---	
Est 1		Est -	
P	3.1	P	--- bar
v	0.5874	v	--- m³/kg
T	407.773	T	--- K
u	2543.77	u	--- kJ/kg
h	2725.87	h	--- kJ/kg
s	6.98003	s	--- kJ/(kg·K)
X	1	X	--- p.u.

Ilustración 22. Captura de pantalla del programa TermoGraf. Propiedades termodinámicas del punto A.

Finalmente se calcula la masa en dicho estado haciendo uso del volumen V_0 calculado y el volumen específico.

$$m_A = \frac{V_0}{v_A} = \frac{0,5097 \text{ m}^3}{0,5874 \text{ m}^3/\text{kg}} = 0,8677 \text{ kg}$$

Propiedades estado A:

Estado A	
P_A	3,1 bar
v_A	0,5874 m³/kg
T_A	407,773 K
u_A	2543,77 kJ/kg
h_A	2725,87 kJ/kg
s_A	6,98003 kJ/(kg·K)
X_A	1
m_A	0,8677 kg

Tabla 3. Propiedades estado A

Estado B

En este estado las propiedades termodinámicas no cambian, pero sí lo hace su volumen, por lo que la masa de vapor también varía. Tenemos que cuenta que $v_A = v_B$.

$$m_B = \frac{V_1}{v_B} = \frac{3,6227 \text{ m}^3}{0,5874 \text{ m}^3/\text{kg}} = 6,1673 \text{ kg}$$

Propiedades estado B:

Estado B	
P_B	3,1 bar
v_B	0,5874 m ³ /kg
T_B	407,773 K
u_B	2543,77 kJ/kg
h_B	2725,87 kJ/kg
s_B	6,98003 kJ/(kg·K)
X_B	1
m_B	6,1673 kg

Tabla 4. Propiedades estado B

Estado C-C'

El siguiente estado se obtiene tras una expansión adiabática, lo que significa que la entropía en el estado C es la misma que en el estado B ($s_B = s_C$). Por otra parte, la masa permanece constante ($m_B = m_C$) ya que la admisión de vapor ha sido cortada, por tanto, con este dato y con el de volumen que es conocido, se puede calcular el volumen específico.

$$v_C = \frac{V_2}{m_C} = \frac{10,4557 \text{ m}^3}{6,1673 \text{ kg}} = 1,695345 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Con los datos de entropía y volumen específico obtenemos las propiedades del estado C utilizando el programa TermoGraf:

Estado C	
P_C	0,92862 bar
v_C	1,695345 m ³ /kg
T_C	370,673 K
u_C	2364,33 kJ/kg
h_C	2521,76 kJ/kg
s_C	6,98003 kJ/(kg·K)
X_C	0,9339
m_C	6,1673 kg

Tabla 5. Propiedades estado C

Estado D-D'

En este estado nos encontramos con que la masa de dicho punto corresponde con la masa del estado A, así como su volumen y volumen específico. Por otra parte, la presión de este estado es la misma que la del estado anterior. De nuevo, a partir de las propiedades termodinámicas conocidas, el programa Termograf permite obtener el resto de propiedades del estado D:

Estado D	
P_D	0,92862 bar
v_D	0,5874 m ³ /kg
T_D	370,673 K
u_D	1085,86 kJ/kg
h_D	1140,41 kJ/kg
s_D	3,25341 kJ/(kg·K)
X_D	0,3232
m_D	0,8677 kg

Tabla 6. Propiedades estado D

Estado E

Los principales datos conocidos de este estado son su volumen específico, siendo éste igual al del estado C, y la presión del vapor que no ha sido condensado que es de 104 libras por pie cuadrado. Este valor transformado en bares es de $P_{\text{Cond}}=0,05$ bar. A partir de estos datos, las propiedades del estado E son:

Estado E	
P_E	0,05 bar
v_E	1,695345 m ³ /kg
T_E	305,985 K
u_E	274,418 kJ/kg
h_E	282,894 kJ/kg
s_E	0,95057 kJ/(kg·K)
X_E	0,060109
m_E	6,1673 kg

Tabla 7. Propiedades estado E

Estado F

Finalmente, damos paso al estado F, cuya presión es conocida y es equivalente a la del estado E y cuyo volumen específico también es conocido ya que $m_F = m_A$.

Propiedades termodinámicas del estado F:

Estado F	
P_F	0,05 bar
v_F	0,5874 m ³ /kg
T_F	305,985 K
u_F	184,707 kJ/kg
h_F	187,644 kJ/kg
s_F	0,63928 kJ/(kg·K)
X_F	0,020803
m_F	0,8677 kg

Tabla 8. Propiedades estado F

Tras la determinación de todos los datos de cada estado del ciclo termodinámico, se comprobará que se cumple el primer principio de la termodinámica tras lo cual se harán cálculos de calor aportado y trabajo.

Teniendo en cuenta que el sistema es abierto en alguna de las transformaciones, definimos el primer principio de la termodinámica como:

$$Q + \int h \, dm = \Delta U + W$$

Teniendo en cuenta que:

$$W = \int p \, dV$$

Pasaremos a considerar la expresión anterior en cada transformación del ciclo para, tras esto, comprobar que se cumple este principio.

Transformación A-B

Transformación adiabática por lo que $Q=0$

$$\int h \, dm = \Delta U + W$$

$$h_{AB} \cdot (m_B - m_A) = u_{AB} \cdot (m_B - m_A) + P_A \cdot (V_1 - V_0)$$

$$h_{AB} \cdot (m_B - m_A) = u_{AB} \cdot (m_B - m_A) + P_A \cdot v_A \cdot (m_B - m_A)$$

$$h_{AB} = u_{AB} + P_A \cdot v_A$$

Por tanto:

$$Q_{AB} = 0$$

$$\int h \, dm = u_{AB} \cdot (m_B - m_A) + P_A \cdot (V_1 - V_0)$$

$$W_{AB} = P_A \cdot (V_1 - V_0)$$

Transformación B-C

Transformación adiabática-reversible de un sistema cerrado por lo que:

$$Q_{BC} = 0$$

$$\int h \, dm = 0$$

$$W_{BC} = -\Delta U_{BC} = m_B \cdot (u_B - u_C)$$

Transformación C'-E

Transformación a volumen constante de un sistema cerrado por lo que:

$$Q_{C'E} = \Delta U_{C'E} = m_{C'} \cdot (u_E - u_{C'})$$

$$\int h \, dm = 0$$

$$W_{C'E} = 0$$

Transformación E-F

Transformación a presión constante de un sistema abierto por lo que:

$$\Delta U_{EF} = m_F \cdot u_F - m_E \cdot u_E$$

$$W_{EF} = P_E \cdot (V_2 - V_0)$$

$$Q_{EF} + \int h \, dm = \Delta U_{EF} + W_{EF}$$

Transformación F-D'

Transformación a volumen constante de un sistema cerrado por lo que:

$$Q_{FD'} = \Delta U_{FD'} = m_{F'} \cdot (u_{D'} - u_{F'})$$

$$\int h \, dm = 0$$

$$W_{FD'} = 0$$

Transformación D-A

Transformación a volumen constante de un sistema cerrado por lo que:

$$Q_{DA} = \Delta U_{DA} = m_D \cdot (u_A - u_D)$$

$$\int h \, dm = 0$$

$$W_{DA} = 0$$

No se han tenido en consideración las transformaciones C-D y C'-D', ya que son transformaciones contrapuestas lo que significa que se anulan entre sí al tratarse del mismo proceso, pero con puntos de vista diferentes.

$$\begin{aligned} \sum(Q + \int h \, dm) = & u_{AB} \cdot (m_B - m_A) + P_A \cdot (V_1 - V_0) + m_{C'} \cdot (u_E - u_{C'}) + m_F \cdot u_F - m_E \cdot \\ & u_E + P_E \cdot (V_2 - V_0) + m_F \cdot (u_{D'} - u_F) + m_D \cdot (u_A - u_D) = P_A \cdot (V_1 - V_0) + P_E \cdot (V_2 - V_0) + \\ & m_B \cdot (u_B - u_C) \end{aligned}$$

Esto ocurre si y solo si $m_F = m_{D'} = m_D = m_A$

Por otra parte:

$$\sum W = P_A \cdot (V_1 - V_0) + P_E \cdot (V_2 - V_0) + m_B \cdot (u_B - u_C)$$

Por tanto, sí se cumple el primer principio de la termodinámica.

A partir de todo lo mencionado anteriormente, se va a proceder al cálculo de otros parámetros de interés, como la masa de carbón, el calor aportado por el vapor o el trabajo efectivo de la máquina.

El primer dato a ser calculado es el flujo de calor generado por la caldera. Para ello debemos conocer el flujo de calor que llega desde la caldera al cilindro, así como el rendimiento de la caldera.

El flujo calorífico que llega hasta la caldera puede escribirse como:

$$\dot{Q}_{Vapor} = \dot{m} \cdot (h_{AB} - h_0)$$

Para realizar el cálculo del flujo másico de vapor, partiremos de la siguiente premisa: la masa entrante al cilindro es la diferencia entre la masa de punto B y la del punto A. Por otra parte, de la bibliografía se conoce la duración de una carrera completa del pistón, siendo ésta de 8 segundos, por tanto, se realiza el cálculo a partir de la siguiente expresión. [8]

$$\dot{m} = \frac{m_B - m_A}{t_{carrera}} = \frac{6,1673 \text{ kg} - 0,8677 \text{ kg}}{8 \text{ s}} = 0,66245 \text{ kg/s}$$

Con este dato conocido y pudiéndose calcular la entalpía del agua a temperatura ambiente, seleccionándose una temperatura ambiente de 15°C, obtendremos el flujo calorífico de vapor que llega desde la caldera. En este apartado también ha de tenerse en cuenta el cambio de estado de líquido a vapor.

$$h_0 = C_p \cdot T + h_{fg} = 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 15^\circ\text{C} + 2257 \text{ kJ/kg} = 2319,7 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{Q}_{Vapor} = \dot{m} \cdot (h_{AB} - h_0) = 0,66245 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (2725,87 - 2319,7) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 269,07 \text{ kJ/s}$$

El rendimiento proporcionado por la caldera es un dato conocido, ya que de la investigación realizada se deduce que éste es de 7/11, ya que se menciona que no todo el poder calorífico de la masa del combustible es capaz de emplearse para la vaporización del agua, y que la relación entre ambos es de 7/11 [8]. Por otra parte, se menciona que dicha relación o rendimiento puede variar de una máquina a otra, sin embargo, al ser el valor más común, se va a elegir dicho dato como el rendimiento de la caldera. Por lo tanto, el calor aportado por el combustible se puede calcular como se muestra a continuación:

$$\dot{Q}_{aportado} = \frac{\dot{Q}_{Vapor}}{\eta_{caldera}} = \frac{269,07 \text{ kJ/s}}{7/11} = 422,82 \text{ kJ/s}$$

A partir del dato anterior y sabiendo que ese calor aportado está relacionado con la masa del combustible, así como con su poder calorífico superior, podemos hallar el flujo de masa de combustible necesaria, así como la cantidad de masa por carrera.

$$\dot{Q}_{aportado} = \dot{m}_c \cdot PCI$$

Según la bibliografía consultada, el combustible utilizado para generar vapor en las calderas era carbón. El dato del poder calorífico dependerá del tipo de carbón usado, así como de su calidad, es por tanto que se ha tomado un valor de 29000 kJ/kg como parámetro medio.

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{Q}_{aportado}}{PCI} = \frac{422,82 \text{ kJ/s}}{29000 \text{ kJ/kg}} = 0,0146 \text{ kg/s}$$

Teniendo en cuenta que la duración de una carrera, o ciclo completo del pistón, es de ocho segundos, podemos calcular la cantidad de masa necesaria para una carrera (m_c):

$$m_c = \dot{m}_c \cdot t_{carrera} = 0,0146 \frac{kg}{s} \cdot 8s = 0,1166 kg$$

A continuación, se calculará el trabajo efectivo que proporciona la maquina térmica, dependiendo esto del rendimiento mecánico de la maquinaria y del trabajo proporcionado por la máquina térmica, sea este trabajo proporcionado por el vapor durante su ciclo termodinámico. Anteriormente ya se estableció la expresión para el cálculo del trabajo por parte del vapor:

$$\sum W = P_A \cdot (V_1 - V_0) + P_E \cdot (V_0 - V_2) + m_B \cdot (u_B - u_C)$$

Por lo que procedemos a la sustitución de valores y por tanto a su cálculo. A este trabajo lo denominaremos trabajo indicado W_i .

$$W_t = 310 kPa \cdot (3,6227 - 0,5097)m^3 + 5 kPa \cdot (0,5097 - 10,4557)m^3 + 6,1673 kg \cdot (2543,77 - 2364,33)kJ/kg$$

$$W_t = 2021,96 kJ$$

Expresamos dicho trabajo en forma de potencia por carrera:

$$\dot{W}_t = \frac{W}{t_{carrera}} = \frac{2021,96 kJ}{8 s} = 252,74 kJ/s$$

El rendimiento mecánico (η_m) de la maquinaria se va a establecer como un 60%, ya que era lo más habitual en las máquinas de esos años.

Por otra parte, se va a establecer un rendimiento de calidad (η_q) del 90% para poder proceder al cálculo de la potencia efectiva.

Por lo tanto, la potencia efectiva por carrera se muestra a continuación:

$$\dot{W}_e = \dot{W}_t \cdot \eta_m \cdot \eta_q = 252,74 \frac{kJ}{s} \cdot 0,6 \cdot 0,9 = 136,48 kJ/s$$

Finalmente, se puede calcular el rendimiento global del motor térmico con los datos ya calculados. Este rendimiento global será la relación entre la potencia efectiva

desarrollada por la máquina y el flujo de calor aportado por el combustible en las calderas:

$$\eta_g = \frac{\dot{W}_e}{\dot{Q}_{aportado}} = \frac{136,48 \text{ kJ/s}}{422,82 \text{ kJ/s}} = 0,3228$$

Se establece, por tanto, que el rendimiento global del motor térmico es de un 32,28%.

6. Modelado tridimensional de la máquina

El modelado tridimensional se ha realizado a partir del desarrollado en el trabajo de fin de grado [1], modificando y creando algunos mecanismos y piezas del conjunto para adaptarlo a los nuevos datos que se han obtenido durante la investigación de la máquina. Del mismo modo hay piezas que no han tenido que ser modificadas, ya que la nueva investigación no ha resultado en nuevas averiguaciones en cómo eran estos elementos.

Tras el modelado tridimensional se hará un análisis estructural mecánico sobre estas piezas teniendo en cuenta datos de la maquinaria real con el objetivo de tener una mayor visión estructural de la maquinaria.

6.1 Antecedentes

Algunos de elementos de la maquinaria se han mantenido tal y como se modelaron previamente, algunos de los más importantes son el balancín, el cilindro, el pistón y las columnas de los que se muestran imágenes de algunos de ellos a continuación.

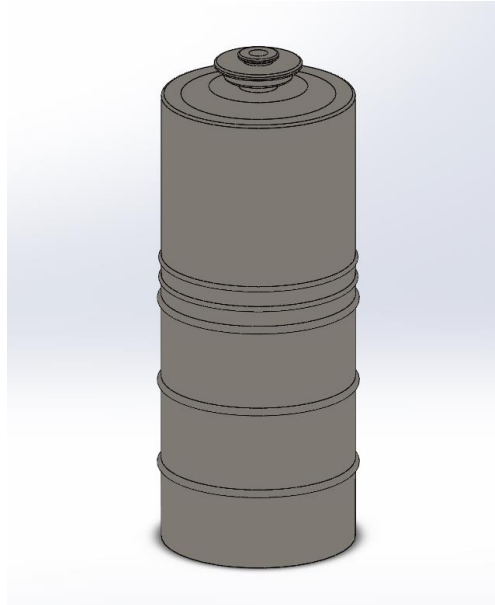


Ilustración 23. Diseño 3D del cilindro

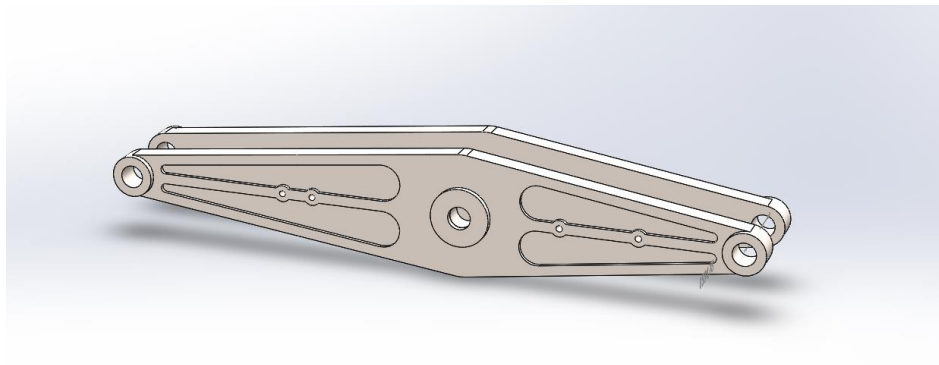


Ilustración 24. Diseño 3D del balancín

6.2 Diseño actualizado

Otros de los elementos han sido modificados atendiendo a distintos criterios

6.2.1. Vástago

Este elemento se ha creado de nuevo debido a la nueva información que se ha obtenido, de esta forma el nuevo elemento presenta una forma distinta, pasándose de un vástago cilíndrico a uno con base cuadrada cuyas aristas tridimensionales han sido ligeramente redondeadas para que el modelo se acerque más a la realidad. Así mismo el ensamblaje con el conjunto se hace directamente con el balancín, sin ningún tipo de movimiento paralelo, ya que así se hacía en las maquinarias de la época.

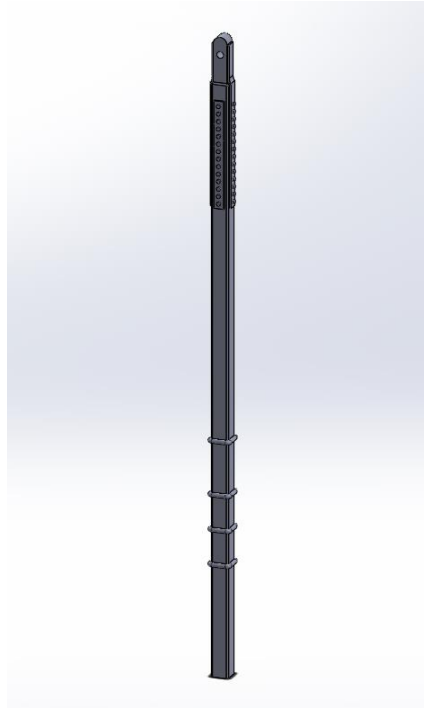


Ilustración 25. Diseño 3D del vástago

Para el diseño de la pieza se han usado varias de las herramientas que el software proporciona, extruir, cortar, barrer, etc. También se ha recurrido a opciones como matriz o simetría para ahorrar trabajo en zonas repetitivas que pueden servirse de estas herramientas.

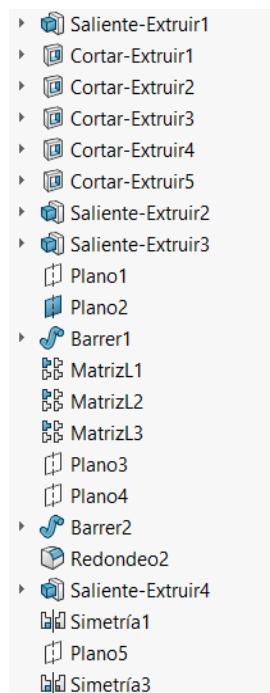


Ilustración 26. Herramientas usadas en Solidworks

6.2.2. Movimiento paralelo de watt

Este conjunto de piezas ha sido estudiado con detenimiento, ya que la posición de las mismas y sus medidas determina la eficacia y verticalidad del movimiento del mismo. Para ello se han usado varios programas que permiten una rápida construcción del mecanismo pudiéndose visualizar su movimiento y el recorrido realizado por cada unión si así se indica.

Las barras deben formar un perfecto paralelogramo, y la posición de las mismas al final de las carreras ascendentes y descendentes debe ser vertical para una mayor facilidad de movimiento. Las dimensiones y ángulos que forman estas barras en el punto de equilibrio del balancín pueden observarse en las siguientes imágenes.

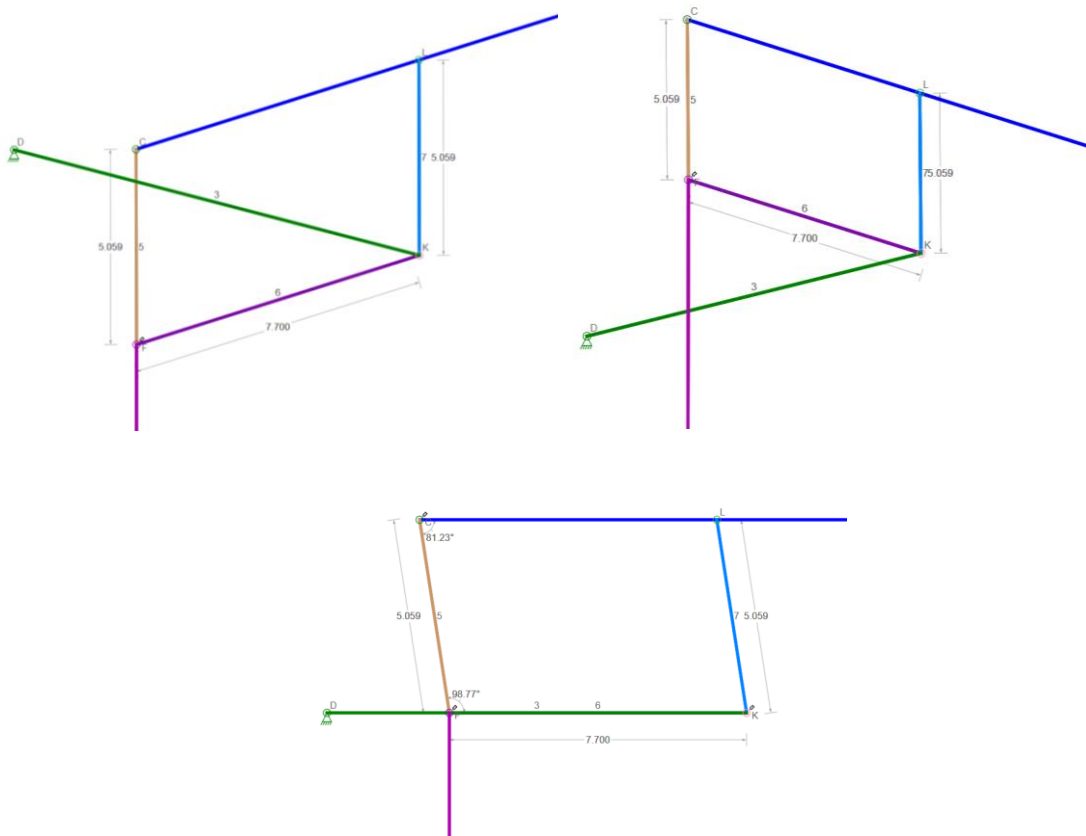


Ilustración 27. Diseño barras paralelogramo de Watt

El punto de anclaje debe coincidir en una horizontal con la barra inferior en el punto de equilibrio del conjunto y su separación no puede distar en gran medida del paralelogramo para no perjudicar la barra de unión entre el anclaje y este. La distancia de separación de esta barra se ha tomado de la imagen referencia de la maquinaria, así como la primera aproximación de las otras barras que se ha perfeccionado

6.2.3. Catarata

El modelado de la catarata de Watt ha sido realizado desde cero, haciendo un conjunto de ensamblado con las tres piezas fundamentales de la misma y otras. Se han simplificado algunos detalles para su modelado ya que este es un complejo sistema que lleva la adición de muchas piezas pequeñas, por tanto, los elementos principales han sido el embolo, la palanca y el tanque circular de agua.

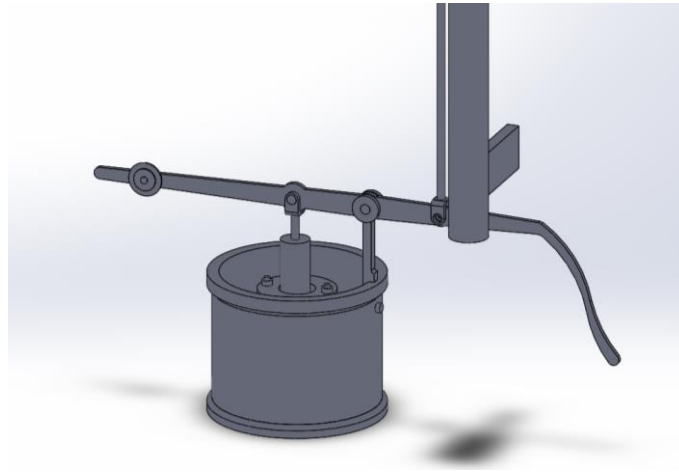


Ilustración 30. Diseño 3D catarata

Para tener una visualización de como este elemento se movía, se han añadido dos barras y se ha creado una animación que muestra este movimiento.

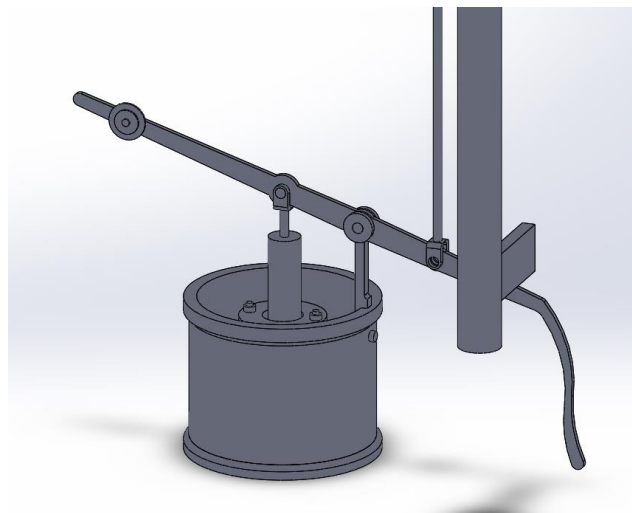


Ilustración 31. Diseño 3D catarata

6.3 Análisis mecánico al modelo

En este apartado se realizará un estudio mecánico en algunos de los elementos tridimensionales diseñados más significativos de la maquinaria, para comprender como se comportaban con las fuerzas que soportaban.

Para realizarlo, supondremos la entrada de vapor al cilindro con una presión de 45 libras por pulgada cuadrada, dato que se considera a partir de las referencias encontradas para las dimensiones de la maquinaria que se ha modelado. Sin embargo, para el análisis, se hará uso de la presión obtenida al final de la carrera descendente del pistón, ya que en este punto el momento ejercido por la fuerza del vapor se puede igualar al momento que produce la fuerza opositora. Dicha presión se ha calculado en el ciclo termodinámico teórico, siendo esta de 0,9286 bar. [8]

Teniendo en cuenta las dimensiones del pistón, se puede obtener la fuerza que el vapor ejerce sobre él y de forma análoga, la fuerza que el vapor ejerce sobre el pistón. Este pistón tiene un diámetro de 80,25 pulgadas. Consideramos todas las medidas en sistema internacional y obtenemos lo siguiente:

Diámetro del pistón: 2,038 m

Presión del vapor en la admisión: 92860 Pa

El área del pistón será: $A = \pi \cdot \frac{D^2}{4} = \pi \cdot \frac{2,038^2}{4} = 3,2621 \text{ m}^2$

La fuerza ejercida sobre el pistón será:

$$F = P \cdot A = 92860 \text{ Pa} \cdot 3,2621 \text{ m}^2 = 302918,606 \text{ N}$$

Se considerará el análisis estático más desfavorable, siendo este al final de la carrera descendente del pistón, cuando el balancín se encuentra momentáneamente en equilibrio, siendo el momento de las fuerzas opositoras iguales al momento de la fuerza del vapor en el preciso instante en que se abre la válvula de agotamiento.

Teniendo en cuenta que un momento M se puede expresar como una fuerza por una distancia, y teniendo en cuenta que las distancias al eje del balancín son 16,6 pies (d_{interna}) y 13,3 pies (d_{externa}) respectivamente tendremos:

$$F_{\text{vapor}} \cdot d_{\text{interna}} = F_{\text{opositora}} \cdot d_{\text{externa}}$$

Despejamos el valor de la fuerza opositora para que el equilibrio en ese punto exista:

$$F_{opositora} = \frac{F_{vapor} \cdot d_{interna}}{d_{externa}} = \frac{302918,606 \text{ N} \cdot 16,6 \text{ pies}}{13,3 \text{ pies}} = 378078,86 \text{ N}$$

Procedemos a la realización del análisis estático con uno de los módulos de SolidWorks específicos para ello. Dentro de la opción análisis se selecciona el análisis estático y se procede a la configuración del mismo.

En primer lugar, hay que seleccionar el material en este caso del balancín para que el modelo tengas las propiedades de dicho material. Por la información que se obtiene de materiales de construcción de los balancines de la máquina de vapor en esa época, se va a escoger la fundición gris como material.

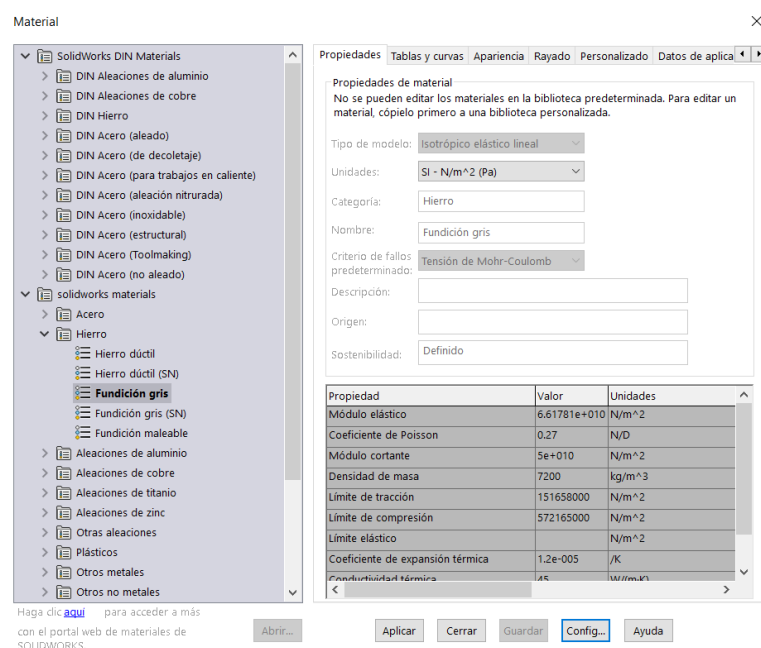


Ilustración 32. Selección de material en SolidWorks

El siguiente paso corresponde con el establecimiento de las sujeciones de la pieza, en este caso la fijación se hará en el extremo derecho del balancín, que es el extremo donde se aplica la fuerza de oposición al movimiento. Del mismo modo se establece el punto de apoyo que es el eje del balancín, esto se hace restringiendo el movimiento radial y axial, y habilitando el movimiento circunferencial con la opción de sujeción sobre caras cilíndricas.

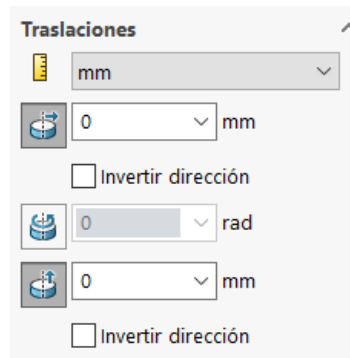


Ilustración 33. Fijación punto de apoyo SolidWorks

Tras ello, se eligen las fuerzas y su posición. En este caso las fuerzas son las mencionadas anteriormente y su punto de aplicación corresponde con los extremos del balancín. Ambas fuerzas tienen la misma dirección para que en el momento del análisis, haya un equilibrio de fuerzas.

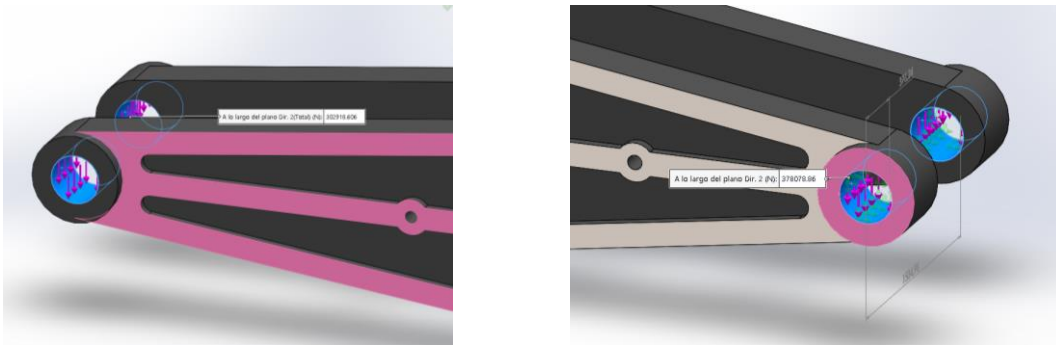


Ilustración 34. Dirección de fuerzas ejercidas en el balancín

Tras la ejecución del análisis se pueden obtener propiedades del sólido como por ejemplo las propiedades volumétricas del mismo:

- Masa: 46193,6 kg
- Volumen: 6,41578 m³
- Densidad: 7200 kg/m³
- Peso: 452697 N

El estudio realizado nos da diferentes tipos de resultados.

Tensión de Von Mises:

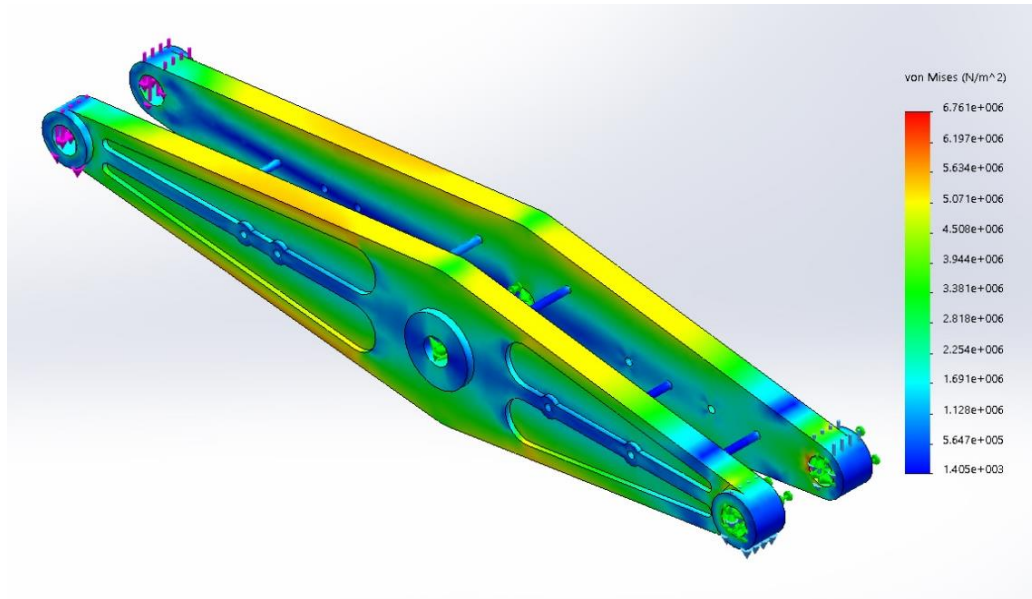


Ilustración 35. Resultados análisis Von Mises

- Valor mínimo: 6,761 Mpa
- Valor máximo: 1,405e-003 Mpa

Desplazamientos resultantes:

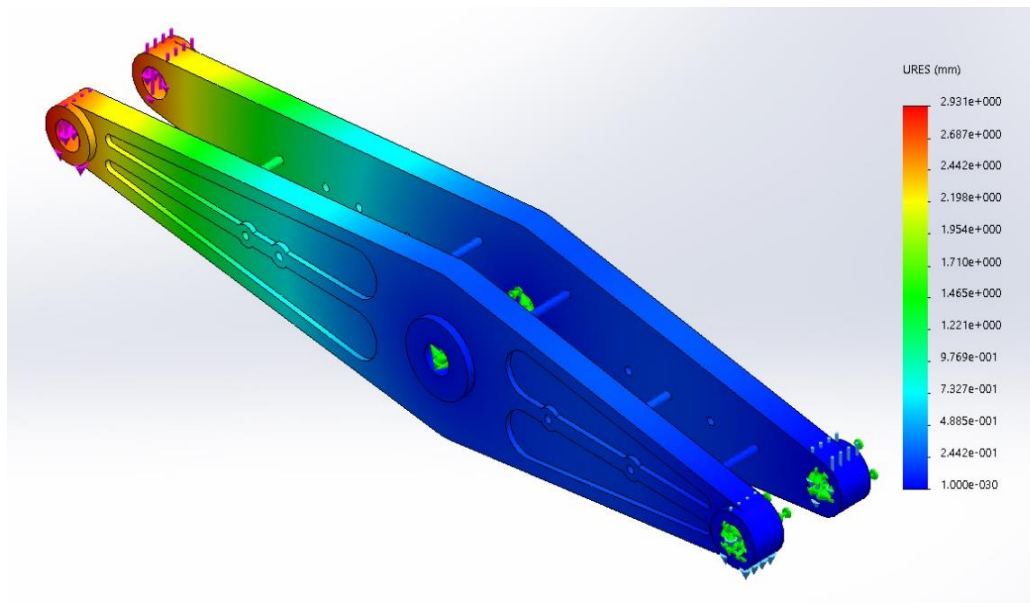


Ilustración 36. Resultados desplazamientos resultantes

- Valor mínimo: 0 mm
- Valor máximo: 2,931 mm

Deformación unitaria equivalente:

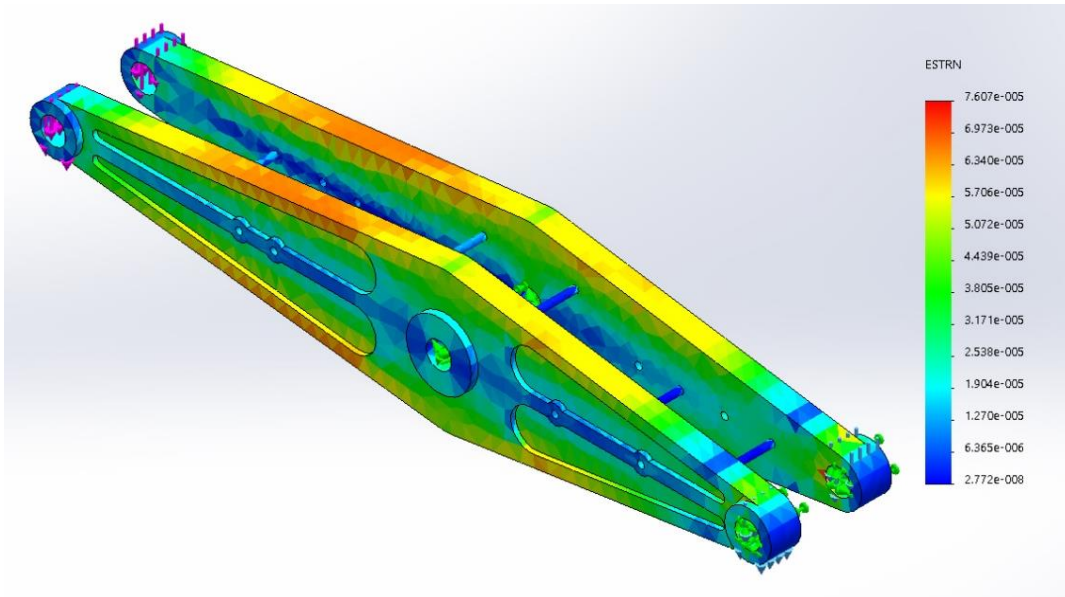


Ilustración 37. Resultados de deformación unitaria equivalente

- Valor mínimo: 2,772e-008
- Valor máximo: 7,607e-005

7. Modelo a escala

A continuación, se detallan algunos aspectos importantes para llevar a cabo la fabricación del prototipo, así como los elementos que se han adquirido para ello.

7.1 Escala

La escala elegida para la fabricación del modelo es de 1:25 siendo esta elegida al adaptarse a las dimensiones requeridas por el pistón, del cual se hablará más adelante. Con el uso de esta escala también conseguimos que el tamaño del modelo sea el adecuado para poder visualizar con mayor detalle la maquinaria.

7.2 Tecnologías usadas para la fabricación del modelo

Debido a la complejidad de algunos de los elementos de la maquinaria, se ha considerado que una de las tecnologías más apropiadas para la fabricación del prototipo sea la fabricación por adición de material.

7.2.1 Fabricación aditiva

La fabricación aditiva o prototipado rápido hace referencia a todas las técnicas de fabricación por adición de material, generalmente capa a capa, empleadas con el propósito de producir nuevos componentes de compleja complejidad a partir de un modelo tridimensional. Esta fabricación se basa en añadir material de forma selectiva, formando un objeto mediante la superposición de capas de forma secuencial de material a partir de un modelo digital previamente desarrollado. A diferencia de los métodos tradicionales de fabricación se añade el material en lugar de eliminarse. [10]

Al igual que otros tipos de tecnologías, la fabricación aditiva fue desarrollada por varios inventores independientes en el mismo periodo temporal. Ya en 1981 Hideo Kodama desarrollo dos impresoras tridimensionales funcionales en el instituto municipal de investigación de Nagoya. Unos años después, en 1984, Chuck Hull firma su patente para una fabricación aditiva llamada estereolitografía, de la cual se hablará en capítulos posteriores. [11]

En 1987 el primer sistema comercial de fabricación aditiva fue lanzado al mercado estadounidense con el principio de estereolitografía, permitiendo a los usuarios por primera vez la generación de un objeto físico a partir de un archivo digital.

La invención de este tipo de tecnologías se dice que fue un “momento decisivo” debido al gran ahorro de tiempo, especialmente en la fabricación de modelos de compleja geometría. A partir de entonces, otros métodos de fabricación aditiva han sido desarrollados. [12]

7.2.1.1. Fundamentos de la fabricación aditiva

A pesar de existir diferentes procesos de fabricación aditiva, generalmente estos siguen los mismos pasos principales para la obtención de una pieza. Estos pasos se describen a continuación.

El primer paso es el modelado tridimensional de la pieza en cuestión. Para ello se recurre a los sistemas CAD-CAM (Computer-Aided Design, Computer-Aided Manufacturing). El software seleccionado dependerá de la complejidad de la pieza. Hoy en día también se puede partir de un escaneado en forma de nube de puntos de

objetos sólidos que pueden generar superficies y sólidos tridimensionales mediante procesos de ingeniería inversa.

Una vez el diseño tridimensional está acabado, este debe ser convertido en formato STL, formato que es prácticamente universal en todos los sistemas de procesamiento de la fabricación aditiva. Este tipo de formato aproxima las superficies del modelo a información matemática constituida por triángulos definidos por la posición de sus vértices y de las relaciones entre ellos. Una desventaja del uso de esta extensión de archivo es el tamaño que este puede llegar a tener, ya que una alta resolución o superficies altamente curvadas requerirán una gran cantidad de triángulos, que se traduce en ficheros de gran tamaño.

A continuación, el fichero en formato STL se introduce en otro programa, dependiendo del tipo de fabricación, que analiza este archivo y este es “cortado en láminas” en sección transversal. Esto crea las capas necesarias para la fabricación del objeto. Dichas capas dependerán del espesor de la misma, que se puede seleccionar en este mismo software. Este software lleva también varias opciones como la orientación, la posición o la adición de soportes que afectan a la fabricación del objeto según el método en que ello se lleve a cabo.

Tras estos pasos previos, la fabricación puede dar comienzo. Este paso está totalmente automatizado por lo que no hace falta una supervisión continua del fabricado, sin embargo, es recomendable la supervisión de las primeras capas. El fabricado puede llevar horas y la duración del mismo dependerá de varios factores como el tamaño de la pieza o la altura de la capa.

Por último, se procede a la extracción de la pieza de la máquina y dependiendo del sistema de fabricación, se procede a un postprocesado. Estas operaciones se realizan de forma manual. [13]

7.2.1.2. Procesos de fabricación aditiva

Estas tecnologías se pueden clasificar de diferentes maneras, según los materiales utilizados o los diferentes tipos de procesos. La clasificación más utilizada es la basada en las características del proceso de fabricación a utilizar.

- **Inyección de aglutinante:** La Inyección de aglutinante o también llamada Binder Jetting es una tecnología de manufactura aditiva o impresión 3D muy versátil que permite imprimir con diferentes tipos de materiales y colores.

El proceso de impresión llevado a cabo con esta tecnología aditiva, consiste principalmente en la pulverización de un aglutinante líquido polimérico sobre un lecho de polvo generalmente cerámico, ubicado en una cubierta originando un material compuesto, el cual compacta con un rodillo y se polimeriza a 40°C. Tras la compactación el material se solidifica en sección horizontal. Cada nueva capa se adhiere secuencialmente con la capa anterior hasta finalmente formar la pieza diseñada con anterioridad al proceso con un software de creación de piezas tridimensionales.

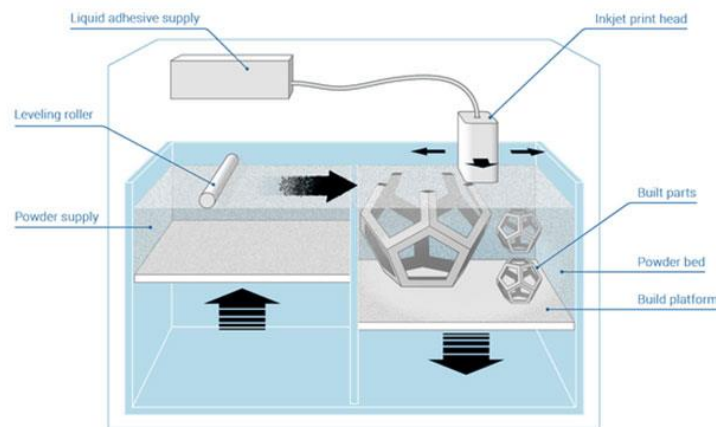


Ilustración 38. Esquema inyección de aglutinante

La inyección por aglutinante puede emplear materiales como cerámicas, resinas, cristal, metal (aluminio, acero inoxidable y plata), termoplásticos y ceras. Incluso cabe la posibilidad de fabricar aditivamente con arena, único material que no requeriría un procesamiento adicional final. La impresión con materiales metálicos requiere un postprocesado de infiltrado térmico, para conseguir la dureza necesaria.

Este tipo de fabricación es una tecnología barata para imprimir con materiales metálicos, aunque su postprocesado es un proceso lento que alargaría el tiempo de finalización de estas piezas. La inyección por aglutinante tiene un buen acabado superficial ya que cabe la posibilidad de aplicar masillas. De

igual modo se pueden infiltrar resinas o fibra de vidrio para mejorar las propiedades mecánicas de las piezas. Por otra parte, esta tecnología no requiere soportes, ya que el polvo de la plataforma de construcción soporta la pieza.

Como desventajas de esta tecnología se puede mencionar la fragilidad de las piezas obtenidas que, si bien son útiles para ser manipuladas o para modelos de apariencia, no tienen alta resistencia mecánica. [14]

- **Estereolitografía (SLA):** A través de un archivo digital creado a partir de un software CAD 3D, normalmente en formato STL, la máquina diseñada para este tipo de fabricación aditiva, va generando capas sólidas de material horizontales a través de la fotopolimerización activa por luz de una resina foto-sensible o foto-reactiva, que, encontrándose en estado líquido, se va solidificando al ser tocada por un rayo láser ultravioleta. estas capas se van adhiriendo sucesivamente de forma secuencial, hasta lograr la materialización tridimensional del objeto diseñado con anterioridad. En este tipo de fabricación aditiva, es necesario imprimir con estructuras de sujeción para evitar la deflexión de la pieza por gravedad y el deslizamiento de la pieza. Estos soportes deben ser retirados del modelo final de forma manual.

Para retirar el exceso de resina una vez que la pieza este completamente acabada, esta se sumerge en un baño químico (generalmente alcohol isopropílico también conocido como isopropanol) y, posteriormente, se cura en un horno de luz ultravioleta.

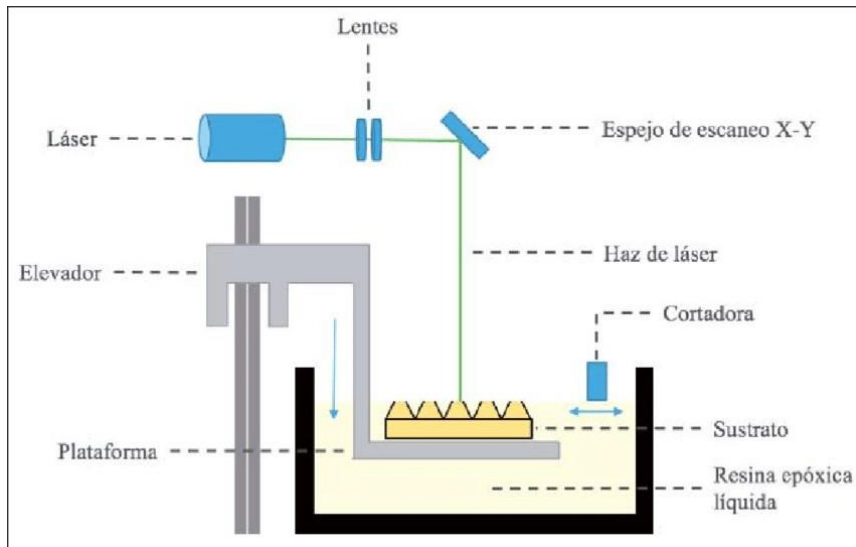


Ilustración 39. Esquema estereolitografía

De forma general se usan resinas plásticas curables por láser de luz ultravioleta como material de impresión, con una gama de materiales cada vez más amplia.

La fotopolimerización en tanque o estereolitografía tiene una alta precisión y resolución con unos acabados superficiales muy buenos. Debido a esta gran resolución de impresión, permite la fabricación de piezas de gran complejidad geométrica. Sin embargo, los fotopolímeros son frágiles por naturaleza aunque son materiales suficientemente duros como para ser mecanizados e incluso se pueden usar para crear nuevos moldes con técnicas de moldeo por inyección, termoconformado o moldeo por soplado. [15] [16]

- **Polyjet:** El sistema de fabricación por polyjet o Material Jetting crea a partir de un software CAD 3D distintas piezas. Estas piezas se crean por pulverización de materiales fotopoliméricos en capas ultra finas sucesivas y horizontales sobre una plataforma de construcción. Cada capa de resina pulverizada se cura posteriormente con luz ultravioleta integrada en el cabezal de impresión para formar cada capa. Cada capa de fotopolímero se adhiere a la anterior hasta formar por completo la pieza diseñada con anterioridad.

Debido a la inmediata curación del material, la pieza una vez impresa no necesitará una posterior curación.

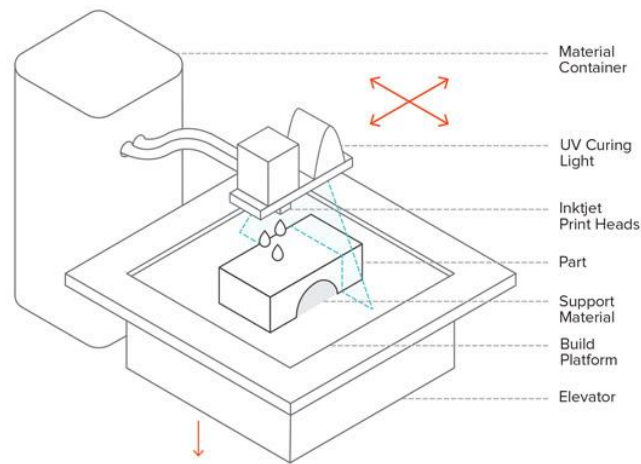


Ilustración 40. Esquema Polyjet

Este tipo de fabricación aditiva tiene un alto grado de precisión y acabados, posibilidad de generar formas complejas, paredes con pequeño espesor, transparencia o translucidez.

La mayor ventaja esta tecnología es su capacidad para imprimir con múltiples materiales con diferentes colores. Este hecho se debe a los cabezales usados para la deposición de material, ya que estos son capaces de inyectar simultáneamente tinta. Del mismo modo, se pueden emplear varios materiales de forma simultánea. Sin embargo, es una tecnología costosa y requiere estructuras de soporte. [14]

- **Deposición de Hilo Fundido (FDM):** La tecnología de deposición de hilo fundido o también conocida como Fused Deposition Modeling (FDM) es una tecnología de manufactura aditiva que permite fabricar prototipos usando para ello diferentes tipos de termoplásticos.

La pieza deseada se crea a partir de un diseño tridimensional con algún software específico para ello. Una vez se tenga el diseño de la pieza, esta se pasa por un segundo software en el que es posible seleccionar los distintos parámetros de impresión para tras esto comenzar con la impresión.

Posteriormente, un filamento de un polímero del termoplástico a emplear, que está en un rollo en zonas exteriores a la cámara de impresión, pasa por una la boquilla metálica de la extrusora, que está a una temperatura superior a la temperatura de fusión del polímero, este se derrite y extruye un filamento de

material sobre la plataforma a través de la mencionada boquilla. El extrusor se mueve a lo largo de los ejes x, y y z y con cada nuevo nivel de capa, La plataforma desciende un nivel hasta que el objeto termina de imprimirse.

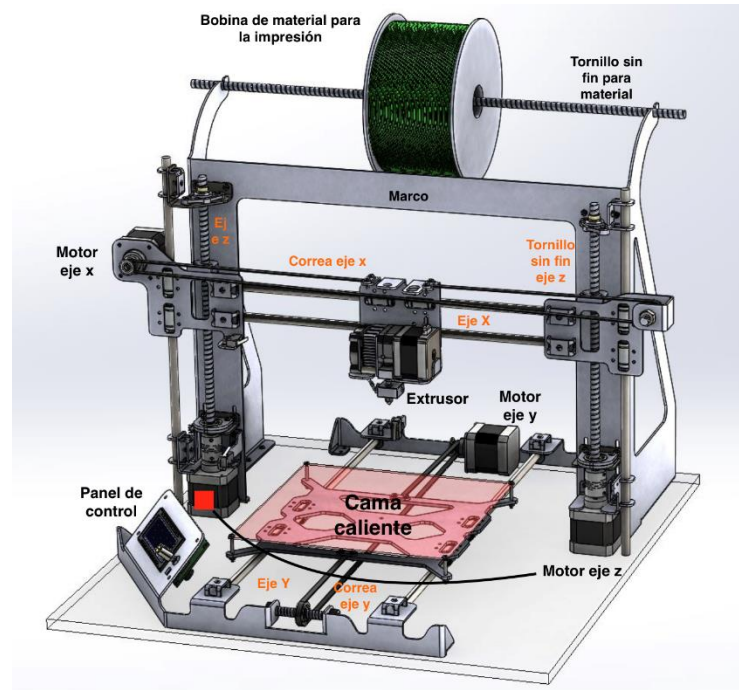


Ilustración 41. Esquema deposición de hilo fundido

Existen una gran variedad de materiales para la deposición de hilo fundido como los polímeros termoplásticos PLA (poliácido láctico) y ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno), siendo estos los más usados para este método de fabricación aditiva. También es compatible con policarbonato como, PET, PS, ASA, PVA, nylon, ULTEM y muchos filamentos compuestos que estén basados en metal, piedra, madera.

La gran ventaja de esta tecnología es la fabricación de piezas en plástico con buenas propiedades mecánicas y a bajo costo, ya que los materiales a usar presentan un bajo precio en comparación con otros empleados en otras tecnologías.

Sin embargo, esta tecnología presenta grandes desventajas como el poco fino acabado superficial, que si bien puede ser mejorado con algún tipo de postprocesado. La anisotropía en el eje Z es otra de las grandes desventajas, ya que la resistencia a esfuerzos mecánicos no es homogénea en este eje.

[14] [17]

- **Fusión de lecho de polvo (SLM):** Este proceso de fabricación usa la energía térmica para fundir de forma selectiva un lecho de polvo. Este lecho de polvo puede estar formado por pequeñas partículas de diversos materiales que al fundirse darán origen al objeto tridimensional diseñado.

Existen cinco procesos distintos que usan este tipo de tecnología: EBM (Electron Beam Melting) o fusión por haz de electrones, SLS (Selective Laser Sintering) o sinterización selectiva por láser, SHS (Selective Heat Sintering) o sinterización selectiva por calor, SLM (Selective Laser Melting) o fusión selectiva por láser, DMLS (Direct Metal Laser Sintering) o sinterización de metal directa por láser. La diferencia entre las distintas técnicas radica en el método de producir la energía térmica necesaria para el proceso.

De forma general, una capa de polvo se distribuye en la plataforma de construcción. Esta capa se encuentra a una temperatura un poco por debajo de la temperatura de fusión del material para evitar cambios bruscos de temperatura y de esta forma obtener un mejor acabado superficial. Los distintos métodos de obtención de energía térmica funden de forma selectiva este lecho de polvo para la obtención de la primera capa de material, para capas sucesivas se repite el proceso. Una vez acabada la pieza, esta se extrae y se limpia el exceso de polvo sobrante.

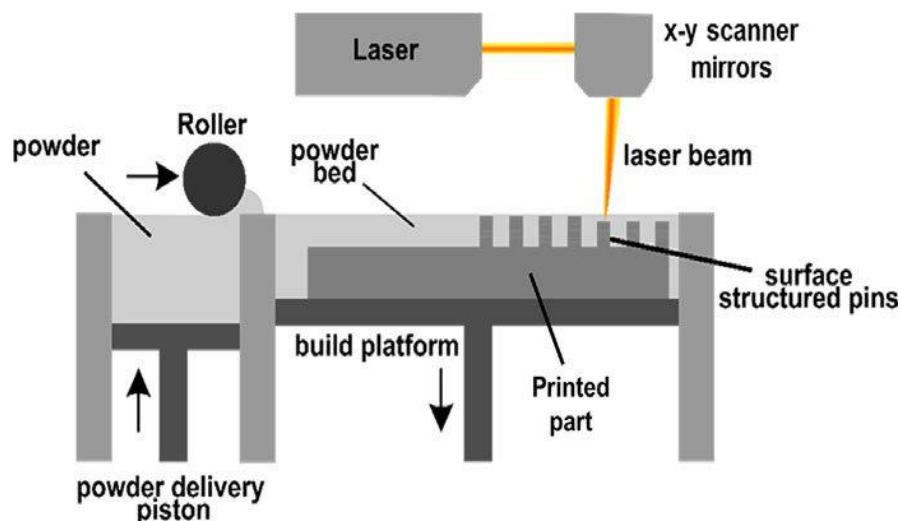


Ilustración 42. esquema fusión de lecho de polvo

Los materiales a emplear en este tipo de tecnología varían dependiendo del proceso a seguir, pero estos abarcan desde materiales metálicos hasta materiales plásticos, cerámicos o vidrio.

Se trata de procesos económicos, con propiedades mecánicas muy similares a las obtenidas mediante procesos de fabricación tradicionales. La gran variedad de materiales es otra de sus grandes ventajas, así como el hecho de no necesitar soportes para obtener la pieza final.

Sin embargo, se trata de un proceso más lento que otros de fabricación aditiva, ya que hay que tener en cuenta que se debe propiciar cierto enfriamiento de la capa para añadirle otra, ya que de lo contrario las propiedades de estas capas podrían empeorar. Por otra parte, su consumo energético es elevado. [14] [18]

7.2.2 Fabricación convencional

En este trabajo, cuando nos referimos a la fabricación convencional nos referimos a la mecanización de piezas, ya que este tipo de procesos se consideran como fabricación convencional a día de hoy.

El mecanizado es un proceso industrial que se realizan en una pieza de materia prima, que pueden ser de diferentes tipos de materiales, previamente conformadas por otros procesos como moldeo o forja, para darle una forma y tamaño final deseados mediante la eliminación o sustracción de material, ya sea por arranque de viruta o por abrasión.

Mecanizado por abrasión: La abrasión es la eliminación de material por desgaste de la pieza en pequeñas cantidades con el uso de una herramienta específica para ello, desprendiendo de esta forma partículas del material que se está mecanizando.

Mecanizado por arranque de viruta: El material se arranca o se corta con una herramienta diseñada para ello dando lugar a una viruta, que se separa de la pieza con esta misma herramienta.

Este tipo de tecnología usada para la fabricación conlleva una serie de ventajas y desventajas como las descritas a continuación.

Ventajas principales:

- Alta precisión
- Amplia variedad de formas
- El material conserva sus propiedades mecánicas ya que su microestructura no varía.
- Buen acabado superficial
- Proceso sencillo de automatizar
- Poco tiempo de preparación

Desventajas principales:

- Desperdicio de material difícil de reciclar
- Uso de gran cantidad de energía
- Gran tiempo de producción
- Tamaño de la pieza limitado por la maquina o herramienta

Dentro de este tipo de tecnología para la fabricación encontramos diferentes opciones de mecanizado que de forma general se pueden clasificar varios grupos, aunque se pueden incluir otras muchas categorías. Las opciones que se han usado para la fabricación de piezas son las explicadas a continuación. [19]

- **Torneado:** es la operación de mecanizado que consiste en el arranque de material de piezas que giran alrededor de un eje. El movimiento rotatorio de la misma pieza junto con el movimiento de avance de la herramienta o su movimiento perpendicular, llevan a cabo la operación de torneado. La máquina que se usa en este tipo de operación es el torno.
- **Fresado:** consiste en el corte de la superficie del material con una herramienta rotativa. En este caso el movimiento de corte lo tiene la herramienta con su propio giro, mientras el movimiento de avance lo realiza la pieza. La máquina que se usa en este tipo de operación es la fresadora.
- **Taladrado:** consiste en la realización del mecanizado de un agujero o taladro del mismo diámetro que la herramienta, llamada broca. La pieza se fija sobre la mesa y dicha herramienta realiza el movimiento de corte, que es giratorio sobre el eje de la herramienta, y el movimiento lineal de avance. [19]

Durante la realización de este trabajo se han usado todas las técnicas mencionadas anteriormente para la fabricación de distintas piezas. Del mismo modo, para dar un acabado más estético a algunas de las piezas fabricadas, se ha usado el mecanizado por abrasión.

7.3 Elementos adquiridos

Los elementos cilindro y pistón de la máquina Cornish para el prototipo han sido adquiridos en vez de fabricados. Se ha optado por adquirir un sistema de pistón neumático accionado con aire a presión para ser automatizado y que ejecute el movimiento de vaivén que tenía la maquinaria.

El hecho de adquirir estos objetos en vez de fabricarlos reside en la complejidad de la fabricación de un cilindro y un pistón con un buen deslizamiento entre ellos y sus correspondientes válvulas. Del mismo modo, el uso de vapor a alta presión tal y como se hacía en la realidad es un hecho complejo y de peligrosa manipulación que requeriría que la fabricación de estos objetos no se pudiese llevar a cabo en termoplásticos debido a la temperatura del vapor, así como su presión.

Debido a estas razones se han adquirido un conjunto de elementos para la composición del prototipo y su movimiento. [20]

7.3.1. Pistón y cilindro

La selección de este elemento se ha hecho en base a la carrera del mismo, que depende de la escala que ha sido elegida. La carrera real del pistón del cilindro era de 10 pies, lo que equivale a 3,48 m, aplicando la escala elegida a este último valor, la carrera del prototipo debería ser de 13,92 cm. El hecho de encontrar un cilindro con tal carrera es imposible. Debido a ello se optó por encontrar aquel que más se asemejara con respecto a dicha longitud de carrera de pistón.

El cilindro neumático escogido es de una serie estandarizada para todos los fabricantes, la serie ISO 6432 de cuerpo cilíndrico. Según su catálogo, las carreras estandarizadas de pistón para esta serie, están comprendidas entre 10 y 500 mm.

Bore Alesaggio	Standard stroke / Corsa Standard													
	10	25	50	80	100	125	160	200	250	300	350	400	450	500
16	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•				
20	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
25	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

Ilustración 43. Diámetro y carrera de pistón disponibles para serie ISO 6432

Finalmente fue escogido el pistón con 125 mm de carrera atendiendo a criterios de similitud con la medida original. El cilindro escogido es de doble efecto, pistón simple y tiene un diámetro de pistón de 25 mm para obtener mayor fuerza.

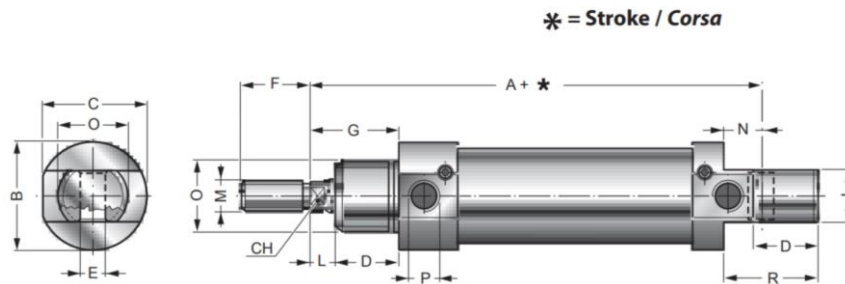


Ilustración 44. Diseño principal del pistón

Diámetro	A	ØB	C	CH	D	ØE	F	G	I	L	ØM	N	ØO	ØP	R
25	104	34	32,5	8	20	8	22	28	16	8	M10x1,25	12	M22x1,5	G1/8	30

Tabla 9. Medidas principales del pistón seleccionado

Entre las características técnicas del pistón destacan las siguientes:

- Rango de temperatura de trabajo del ambiente: -10 – 80 °C
- Rango de temperatura de trabajo del fluido: 0 - 40°C
- Fluido: Aire
- Lubricante: No necesario
- Máxima presión de operación: 10 bar.

7.3.2. Electroválvula y finales de carrera

La idea original del montaje del sistema para la recreación del movimiento, fue hacerlo de forma totalmente mecánica, sin el uso de la electricidad u otra tecnología para evitar en la medida de lo posible el uso de dichas tecnologías que no se usaban en la época para tales maquinarias. Por ello se barajó la posibilidad de usar finales de carrera mecánicos, así como una válvula distribuidora mecánica, que desviase el flujo de aire comprimido cada vez que se accionasen dichos finales de carrera. Sin

embargo, la posición del cilindro haría necesaria la colocación de estos finales de carrera por encima del pistón, obligando a la colocación de un soporte para ellos que debido al balancín que se encontraría en la parte superior y a otras piezas del mecanismo, así como el par que sufriría el final de carrera y su soporte, este sistema es inviable para la recreación de la maquinaria ya que su uso daría muchos problemas y obligaría a hacer una gran estructura pesada.

Debido a lo anteriormente mencionado, se ha optado por el uso de una electroválvula y unos finales de carrera electromagnéticos. La principal misión de la electroválvula es la desviación del flujo de aire comprimido a las cámaras superior e inferior del cilindro para accionar de esta forma el movimiento del mismo. Esta desviación se ejecuta por impulsos eléctricos que le llegan a la válvula por medio de los finales de carrera o detectores magnéticos que detectan la posición del cilindro.

La electroválvula escogida es un modelo SY3220-5LOU-M5-Q. esta electroválvula pertenece a la serie SY3000, que determina características de caudal siendo estas de 1.1 dm³/(s.bar). Esta válvula es biestable de dos posiciones a ser conectada a 24 V.

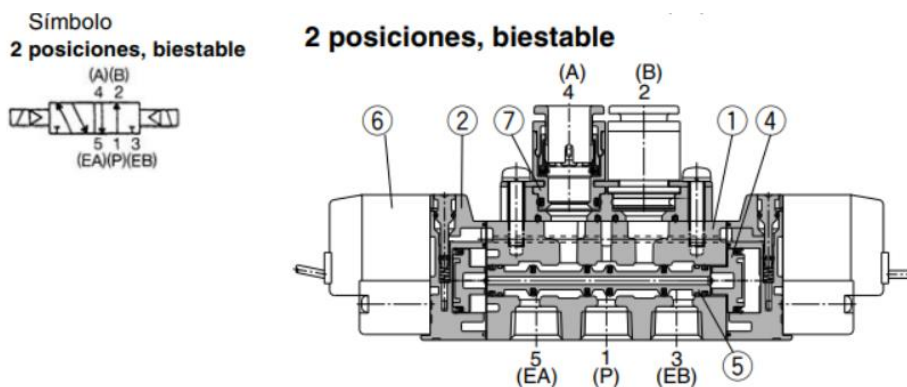


Ilustración 45. Esquema de la electroválvula

Lista de componentes

Numero	Designación	Material
1	Cuerpo	Cinc fundido
2	Placa adaptadora	Resina
3	Placa terminal	Resina
4	Embolo	Resina
5	Válvula Corredera	Aluminio
6	Válvula de pilotaje completa	
7	Bloque de conexión M5	

Tabla 10. Componentes de la electroválvula

Características técnicas más importantes:

- Fluido: aire
- Rango de presión de trabajo: 0.1 - 0.7 MPa
- Rango de temperatura de trabajo del fluido y del ambiente: -10 – 50 °C
- Frecuencia máxima de trabajo: 10 Hz
- Lubricación: No necesaria
- Resistencia a impactos: 150/30 m/s²

Existen distintos tipos de detectores magnéticos, que se ajustan a las necesidades del usuario y sobre todo se ajustan a la geometría y dimensiones del cilindro. El modelo de detector magnético óptimo para el pistón de la serie ISO 6432 de cuerpo cilíndrico que se ha adquirido, es un modelo de montaje en banda. Se trata de un detector magnético D-C73-M8(F), este detector es de tipo Reed.

Los detectores tipo Reed contienen un contacto de posición normalmente abierta que se activa y se cierra cuando se encuentra bajo el efecto de un campo magnético. Cuando el campo magnético se aleja, este contacto se vuelve a abrir. Estos sensores activan la electroválvula.

Los detectores adquiridos se colocarán en los extremos del pistón para que su función sirva como finales de carrera. Su colocación se hará mediante unas bandas que se ajustan al diámetro del pistón, de ahí el nombre que recibe de detector de montaje en banda.

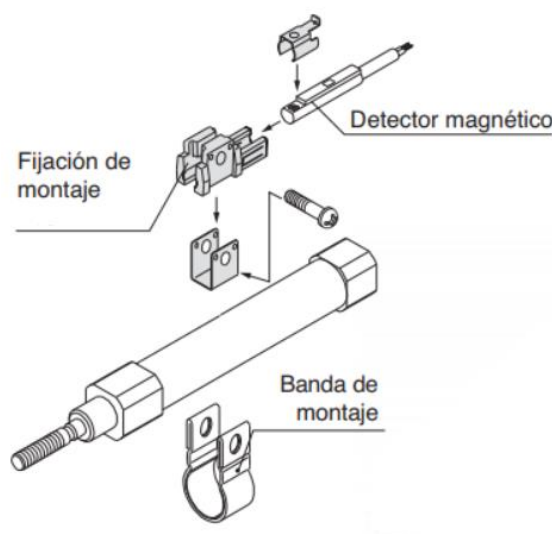


Ilustración 46. Esquema montaje del detector magnético en el pistón

Las características más importantes sobre el detector magnético D-C73-M8(F) se muestran a continuación:

- Tensión de carga: 24 V cc
- Rango de corriente de carga: 5 a 40 mA
- Caída de tensión interna: 2.4 V o menos
- LED indicador: ON con diodo de luz roja encendido
- Circuito de protección de contactos:

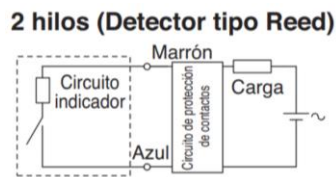


Ilustración 47. Circuito de protección de contactos

7.3.3. Otros elementos

Para el correcto funcionamiento del circuito neumático se han adquirido otras piezas fundamentales como una fuente de alimentación, reguladores de caudal y accesorios como racores o silenciadores.

La fuente de alimentación adquirida es de 24 V ya que es ésta a la tensión que trabajan la electroválvula y los detectores magnéticos.

Para la regulación de caudal de aire de entrada al cilindro y de esta forma controlar la velocidad del mismo, se han adquirido dos reguladores de caudal, uno para cada parte del cilindro. El objetivo principal para la ejecución del movimiento del prototipo es la variación de la velocidad del pistón, pudiéndose ajustar ésta a la velocidad real que tenía la maquinaria.

El caudal de aire se puede regular mediante un tornillo incorporado en el regulador, según el número de vueltas del tornillo así se ajusta el caudal de entrada.

A continuación, se muestra el diseño del regulador:

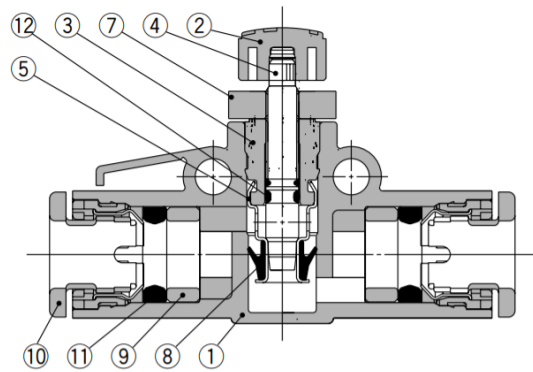


Ilustración 48. Esquema del regulador de caudal

Numero	Descripción	Material
1	Cuerpo A	PBT
2	Regulador	PBT
3	Cuerpo B	Latón
4	Tornillo	Latón
5	Asiento	Latón
6	Guía del tornillo	Latón

Tabla 11. Componentes del regulador de caudal

El resto de elementos adquiridos son racores para la válvula y para el cilindro, conectores para los componentes eléctricos, silenciosos para la electroválvula y tubería de 4 mm de diámetro para el conexionado neumático. El esquema de conexión de todos estos elementos se describe en el apartado de montaje de la maquinaria.

8. Fabricación de los elementos

A partir de los modelos tridimensionales diseñados en SolidWorks y haciendo uso de la herramienta escala, las piezas del modelo han sido escaladas para su posterior fabricación por adición. La mayoría de las piezas fabricadas con esta tecnología lo harán mediante deposición de hilo fundido, y una de ellas lo hará por medio de estereolitografía.

8.1 Fabricación mediante deposición de hilo fundido

Mediante la deposición de hilo fundido se han fabricado numerosas piezas, debido a su acabado y la facilidad de fabricación con el uso del software adecuado.

8.1.1 Material empleado

Los materiales utilizados para la fabricación de piezas por medio de deposición de hilo fundido han sido el PLA (poliácido láctico) y filamento Onyx (Nylon mezclado con fibra de carbono picada).

8.1.1.1. PLA

Este tipo de material es un plástico biodegradable que se obtiene de la naturaleza, en concreto se obtiene a partir del almidón extraído del maíz, la remolacha y el trigo. Hoy en día El PLA es uno de los materiales más utilizados en fabricación aditiva por extrusión de material, ya que no desprende gases nocivos y a que la impresora a utilizar no necesita tener una cama con base caliente lo que hace que sea muy sencillo imprimir con este tipo de material. Además de lo mencionado anteriormente, este termoplástico tiene muchas características equivalentes, e incluso mejores, que muchos de los plásticos derivados del petróleo. [21] [15]

A continuación, se describen las principales propiedades del filamento de PLA:

PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES	MÉTODO DE TESTEO
Propiedades generales			
Densidad	1,24	g/cm ³	ASTM D792
Propiedades mecánicas			
Módulo elástico en flexión	3600	MPa	ISO 178
Resistencia a la flexión	108	MPa	ISO 178
Dureza Sh D	85	Sh D	ASTM D2240
Propiedades térmicas			
Temperatura de flexión bajo carga	56	°C	ISO 75/2B
Temperatura de fusión	145-160	°C	ASTM D3418
Temperatura de transición vítrea	56-64	°C	ASTM D3418
Propiedades de impresión			
Temperatura de impresión	210	°C	
Temperatura cama caliente	0-60	°C	

Tabla 12. Propiedades filamento PLA

8.1.1.2. Fibra Onyx

Este nuevo material ha sido creado por Markforged, las propiedades de dicho material permiten una estabilidad dimensional que esta adecuada para las exigencias que requieren las aplicaciones de ingeniería, así como además permite una impresión 3D fluida y sin problemas. La fibra Onyx posee la dureza del nylon y la rigidez del plástico reforzado con fibra, además de una temperatura de desviación térmica de 145 °C. El material se adapta perfectamente a aplicaciones que requieran un alto rendimiento, gracias a la fibra de refuerzo de micro carbono que produce piezas más estables, mayor estabilidad dimensional e impresiones muy fiables. [22] [23]

Las propiedades principales de la fibra Onyx se describen en el siguiente cuadro:

PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES	MÉTODO DE TESTEO
Propiedades generales			
Densidad	1,2	g/cm ³	-
Propiedades mecánicas			
Módulo de tracción	1,4	GPa	D638
Tensión de tracción a rendimiento	36	MPa	D638
Deformación a la tracción	25	%	D638
Tensión de tracción a la rotura	30	MPa	D638
Deformación a la rotura	58	%	D638
Resistencia a la flexión	81	MPa	D790
Módulo de flexión	3,6	GPa	D790
Propiedades térmicas			
Temperatura de deflexión térmica	145	°C	D648 B

Tabla 13. Propiedades fibra Onyx

8.1.2 Equipo utilizado

8.1.2.1. Impresión con PLA

Para llevar a cabo la impresión de las distintas piezas, se ha utilizado la impresora 3D BQ Witbox de un extrusor. [24]



Ilustración 49. Impresora 3D BQ Witbox

Las características técnicas más importantes son las siguientes:

- Dimensiones de la impresora: (x)505 x (y)388 x (z)450 mm
- Dimensiones área de impresión: (x)297 x (y)210 x (z)200 mm
- Resolución: 50 / 100 / 200 / 300 micras
- Bastidor y partes móviles de acero pintado al polvo
- Boquilla del extrusor de 0,4mm con tobera de refrigeración de pieza
- Velocidad de impresión recomendada: 50 mm/s
- Velocidad máxima de impresión recomendada: 80 mm/s
- Pantalla de LCD con encoder rotativo con pulsador para la navegación
- Base fría de cristal tamaño A4 (29,7 x 21,0 cm)
- Entorno recomendado: Cura Software
- Archivos admitidos: .stl, .gcode
- OS compatibles: Windows XP y superiores Mac OS X y superiores Linux
- Lector de tarjetas SD estándar
- Puerto USB tipo B

8.1.2.2. Impresión con fibra Onyx

Para llevar a cabo la impresión de las piezas con la fibra Onyx, se ha utilizado la impresora tridimensional Markforged Onyx Pro Gen 2, con dos cabezales, uno de ellos destinado a la incorporación de fibra de vidrio continua a la pieza. [25]

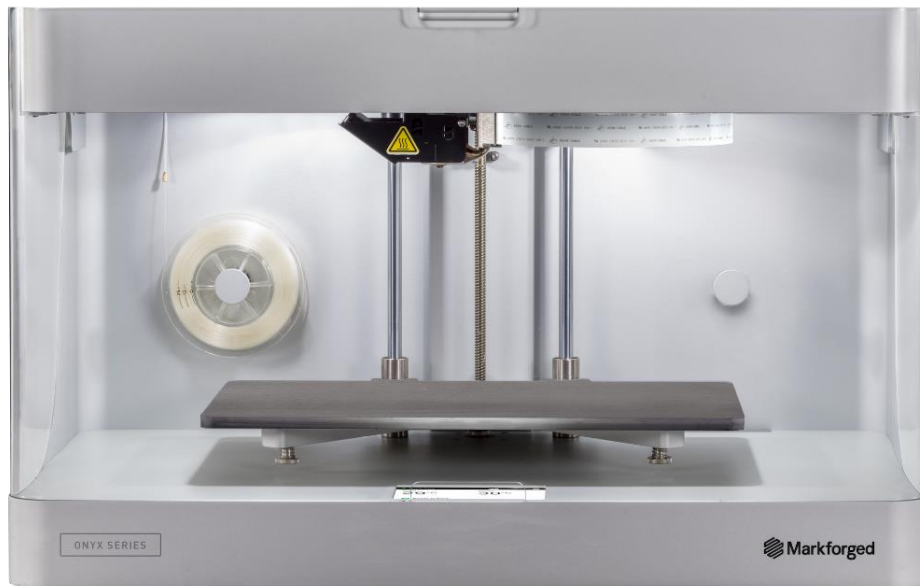


Ilustración 50. Impresora 3D Markforged Onyx Pro Gen 2

Entre sus características más notables encontramos las siguientes:

- Dimensiones de la impresora: (x)584 x (y)330 x (z)355 mm
- Dimensiones área de impresión: (x)320 x (y)132 x (z)154 mm
- Resolución: 100 μm predeterminado, 200 μm máximo
- Cama de impresión: Acoplamiento cinemático - plano hasta 160 μm
- Extrusión: Extrusora de segunda generación, detección de falta de plástico
- Potencia: 100 –240 VCA, 150 W (2 A pico)
- Fibras: fibra de carbono, fibra de vidrio, Kevlar, fibra de vidrio HSHT
- Paquete de software: Eiger (otras opciones disponibles)
- Peso: 16 kg

8.1.3 Parámetros a tener en cuenta durante la deposición de hilo fundido

- **Contracción del material:** Para obtener una pieza impresa de gran calidad hay que tener en cuenta la contracción o dilatación que puede sufrir el material al ser enfriado tras la deposición del mismo. El control de dicha contracción puede llevarse a cabo por las distintas impresoras, algunas de ellas reajustando automáticamente el modelo a ellas para una mayor precisión de fabricación.
- **Warping:** El “warping” o despegado de bordes es un problema muy común en la impresión de piezas que tienen gran superficie. El curvado o despegado se produce por una mala adhesión a la cama por un mal calibrado o debido al enfriamiento brusco del material, que hace que este se contraiga de forma prematura antes de que llegue la siguiente capa. Para evitar este problema, se debe calibrar bien la máquina y controlar la temperatura de la cama para el material que se esté imprimiendo.
- **Agujeros:** De forma general, los agujeros fabricados por extrusión tienden a empequeñecerse, por tanto, si estos deben tener una gran precisión, deberán ser perforados una vez obtengamos la pieza en cuestión para garantizar su tamaño.
- **Espesor de pared:** El espesor óptimo de pared del objeto a imprimir dependerá del espesor de capa con el que se vaya a trabajar. Es recomendable que el espesor de pared sea de al menos cuatro veces el espesor de capa seleccionado.

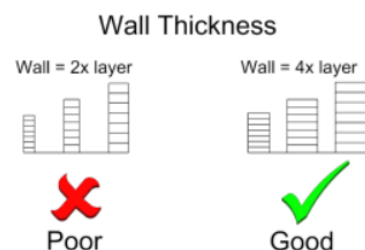


Ilustración 51. Parámetro espesor de pared

- **Roscados:** Es recomendable evitar los bordes afilados, ya que los bordes afilados pueden ser concentradores de tensión. Los roscados en FDM funcionan bien con crestas redondeadas, pasos no muy bajos ni longitudes largas. Se recomienda usar un diseño “dog point”.

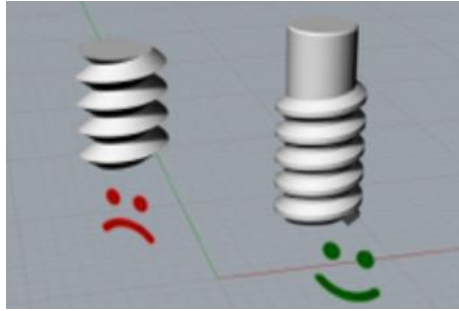


Ilustración 52. Parámetro roscado

- **Ensamblajes:** Las piezas fabricadas por extrusión de hilo fundido permiten la intersección y ensamblaje de distintas piezas. Se ha de considerar una holgura mínima de 0,4 mm para ensamblajes de piezas que requieran movimiento entre sí o una holgura mínima de 0,3 mm si se trata de un ensamblaje que no requiera movimiento entre las distintas piezas. [26]

8.1.4 Piezas fabricadas con PLA

8.1.4.1. Cilindro

El diseño original del cilindro ha tenido que ser remodelado ya que esta pieza impresa servirá como carcasa al cilindro neumático y sus componentes, por tanto, su diseño se ha tenido que adaptar a las medidas de este. Por otra parte, se ha hecho un corte en el diseño para poder introducir el pistón neumático sin la necesidad de desmontarlo.

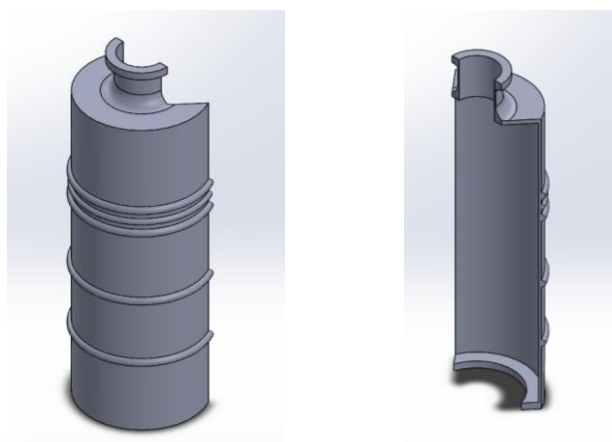


Ilustración 53. Diseño 3D del cilindro para impresión

8.1.4.2. Puertos de válvulas, tubería de equilibrio y tubo de educción

El modelado de todas estas partes fue llevado a cabo de forma conjunta para mayor simplicidad y mayor precisión. La envergadura de dicho modelado ha impedido que este pudiese ser fabricado de una sola pieza, ya que excede los límites de la cama de impresión de la máquina. Por este motivo, se ha cortado en dos partes, que se han unido con el adhesivo adecuado para PLA.

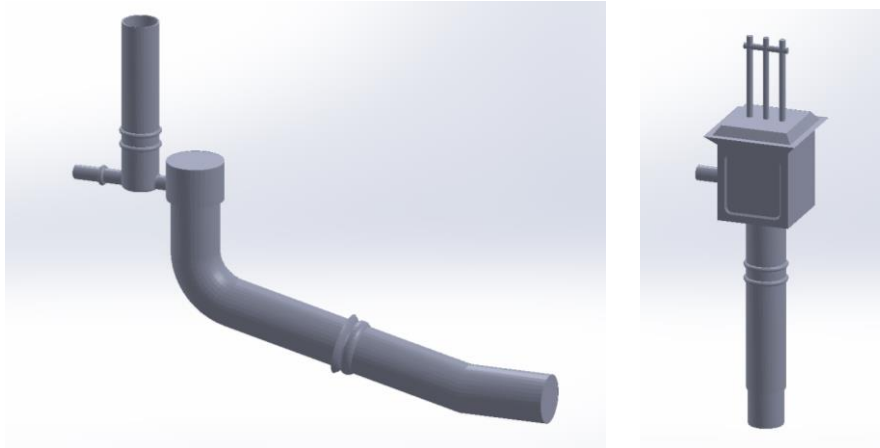


Ilustración 54. Diseño conjunto de puertos de válvulas y tubería de educción

Para una unión más firme y correcta, se ha extruido una porción saliente en la parte superior del elemento de tal diámetro que esta parte encaje en la cavidad de la parte inferior del mismo. Para no tener problemas con ello, la parte inferior se ha impreso sin material de relleno, ya que dicho material podría ser de extracción complicada, pudiendo dañar la pieza. Posiblemente debido a la supresión de este relleno, en el resultado final podría haber supuesto una reducción del diámetro de la tubería ya que un principio ambas piezas no encajaron. Para solventar este problema se ha optado por limar con diversas herramientas la parte saliente de la pieza superior con objeto de reducir su diámetro y de esta forma encajar ambas piezas con facilidad, y obteniéndose con ello un buen resultado final.

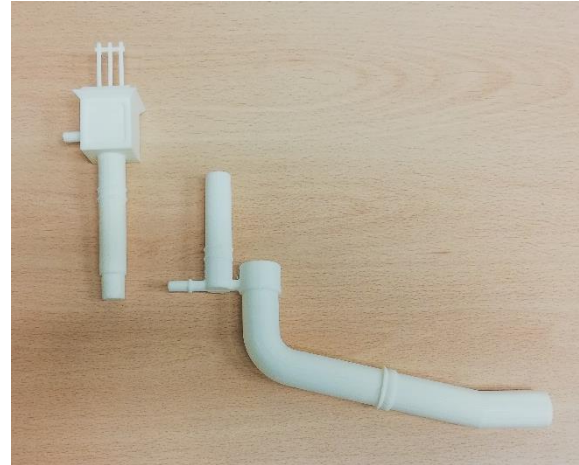


Ilustración 55. Resultado de impresión conjunto de puertos de válvulas y tubería de educación

8.1.4.3. Catarata

La fabricación de este conjunto de piezas tan peculiar se ha tenido que llevar a cabo en dos fases. Por un lado, se ha impreso la palanca y por otro se ha impreso el tanque con el embolo y en resto de las piezas del conjunto. Al ser de tan reducido tamaño, la manipulación de los elementos, así como las tolerancias de impresión han impedido que se hayan podido imprimir por separado todas las piezas del subconjunto para posteriormente ser ensambladas. Debido a lo mencionado anteriormente el movimiento del conjunto se ha tenido que suprimir.



Ilustración 56. Resultado de impresión catarata

8.1.4.4. Balancín

Para la impresión del balancín se ha procedido a realizar un prototipo sólido y robusto con el objeto de asegurar este elemento a cualquier fuerza ejercida por el pistón ya que es el elemento que soporta mayores cargas.

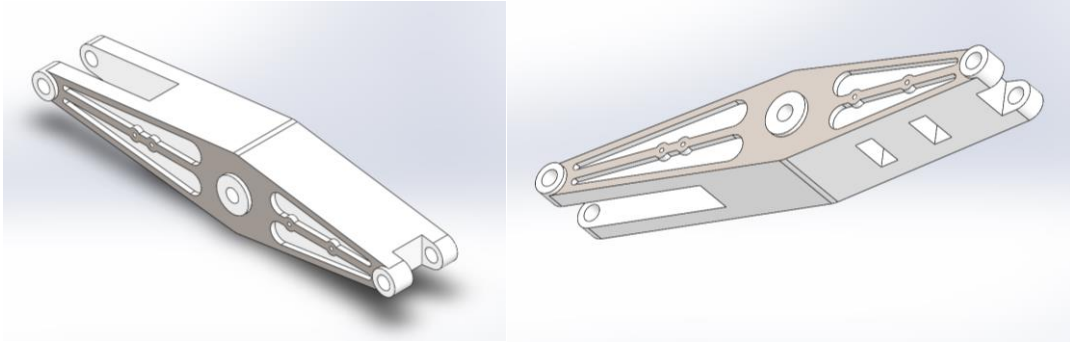


Ilustración 57. Modelado 3D balancín

Debido al tamaño de la pieza escalada, esta ha tenido que ser partida para poder imprimirla y posteriormente ser pegada. En el corte realizado se han diseñado dos pestañas para asegurar la sujeción de ambas partes tras ser pegadas y evitar posibles problemas derivados de este corte.

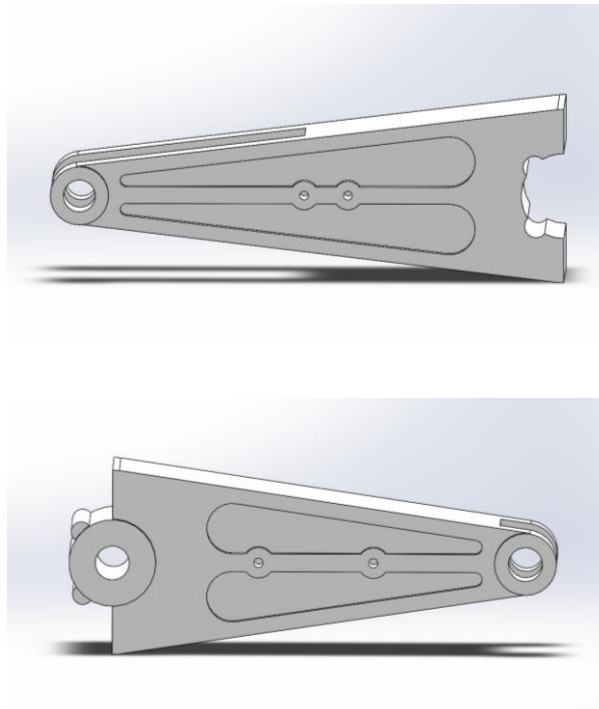


Ilustración 58. Diseño 3D corte balancín

Para la impresión de este prototipo, se han modificado algunos valores dentro de Cura tales como la altura de capa, la densidad de relleno, el patrón del relleno y la temperatura. Los tres primeros parámetros han sido elegidos con el objetivo de reducir la cantidad de material a emplear y con ello el tiempo de impresión. La temperatura de impresión ha sido elegida en función al material a emplear, siendo este PLA.

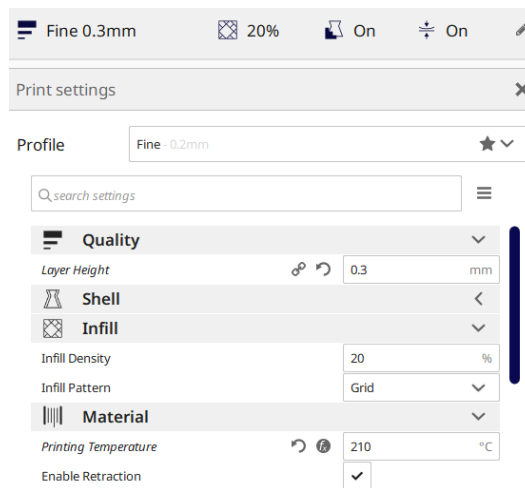


Ilustración 59. Características de impresión del balancín con PLA

Finalmente se puede observar como ha quedado este elemento en la siguiente fotografía.



Ilustración 60. Balancín impreso, vista 1

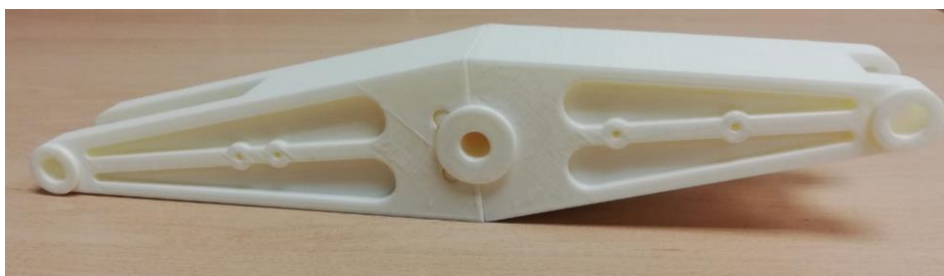


Ilustración 61. Balancín impreso, vista 2

8.1.4.5. Otras piezas

Otras piezas fabricadas con PLA mediante deposición de hilo fundido son el condensador, sujeción del eje principal y vigas principales de la casa.

El condensador no ha presentado ninguna dificultad, o modificación con respecto al modelado tridimensional inicial.



Ilustración 62. Condensador impreso

Las sujeciones del eje principal con las columnas de la maquinaria sin embargo fueron modificadas con respecto al modelado que se hizo inicial, ya que la dimensión de las mismas depende del de las columnas. Por otro lado, la parte superior se modifica para que el eje es completamente sujeto, evitando posibles problemas si esto no ocurriera.

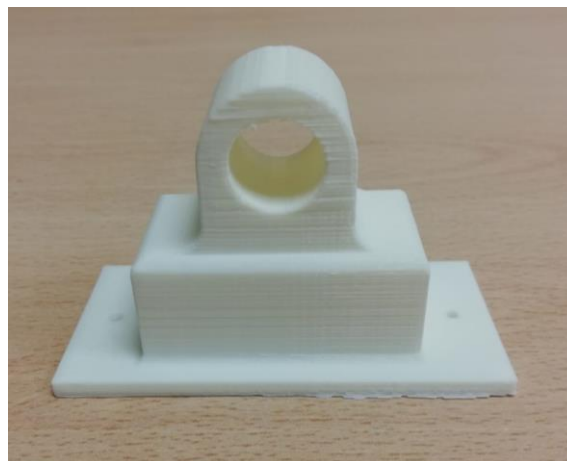


Ilustración 63. Sujeción del eje principal impresa

Las vigas principales de la casa tampoco presentan modificaciones o dificultad alguna.



Ilustración 64. Viga principal impresa

8.1.5 Piezas fabricadas con fibra Onyx

Debido a la ruptura de una pequeña porción de la zona izquierda del balancín, este ha tenido que ser reimpresso. Al ser el elemento principal de la maquinaria, se optó por modificar el material de impresión con el objeto de mejorar la dureza de esta pieza y asegurar su durabilidad ante posibles golpes. Al tratarse de un elemento compuesto por dos piezas, ambas han sido impresas de nuevo para asegurar la continuidad de las propiedades del elemento.

Esta nueva impresión requiere de diferentes parámetros ya que se ha usado una nueva máquina, así como un material diferente. La altura de capa máxima que nos ha permitido Eiger, el nuevo software de preparación de las piezas a imprimir, ha sido de 1mm, por tanto, el tiempo de impresión se aumentaba considerablemente. Sin embargo, la nueva impresora usada tiene una opción de impresión rápida, haciendo disminuir el tiempo de impresión. Otros parámetros modificados han sido la densidad de relleno y su patrón.

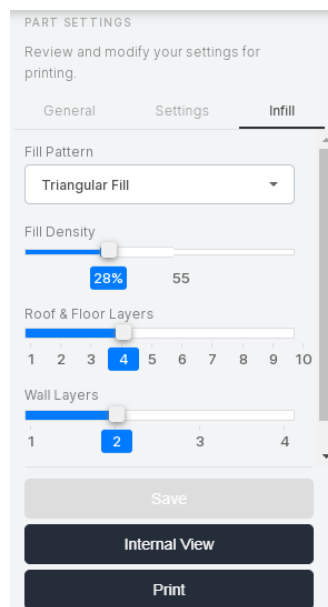


Ilustración 65. Características de impresión del balancín con fibra Onyx

Esta nueva impresión nos ha dado la posibilidad de observar un gran cambio en el acabado superficial de la pieza, siendo este mucho mejor posiblemente debido en gran parte a la altura de capa elegida. Debido al cambio de material, se ha podido observar que la contracción de material es distinta ya que se han usado los mismos archivos de impresión y sin embargo el diámetro de las perforaciones de ambas piezas son distintos, siendo los de la impresión de PLA menores. El ajuste del ensamblaje de

ambas partes de la pieza también presenta diferencias, ya que las pestañas diseñadas para el ajuste presentan un mayor ajuste en la pieza de PLA.

8.2 Fabricación mediante estereolitografía (SLA)

Mediante este tipo de tecnología, se ha fabricado la bomba de aire. El material utilizado, al ser translucido, permite visualizar el pistón que alberga en su interior. Esta pieza también ha sido cortada y por la tapa para poder introducir el pistón en su interior sin ningún problema.



Ilustración 66. Resultado impresión de bomba de aire

8.2.1 Material empleado

El material utilizado para la fabricación por medio de la tecnología de estereolitografía es una resina fotopolimérica. Esta resina es un compuesto químico que se encuentra en estado líquido, y que al contacto con la luz ultravioleta se solidifica. La resina utilizada en la pieza es una resina estándar translúcida (FLGPCL04) cuyas características más importantes se encuentran en la siguiente tabla. [21]

PROPIEDAD	VALOR SIN CURADO	VALOR CON CURADO	MÉTODO DE TESTEO
Propiedades mecánicas			
Resistencia a la tracción	38 MPa	65 MPa	ASTM D 638-10
Módulo de tracción	1600 MPa	2800 MPa	ASTM D 638-10
Alargamiento a la rotura	12%	6.2%	ASTM D 638-10
Módulo de Flexión	1200 MPa	2200 MPa	ASTM C 790-10
Resistencia al impacto Izod	16 J/m	25 J/m	ASTM D 256-10
Propiedades térmicas			
Temperatura de reblandecimiento (1.8 Mpa)	42.7 °C	58.4 °C	ASTM D 648-07
Temperatura de reblandecimiento (0.45 Mpa)	49.7 °C	73.1 °C	ASTM D 648-07

Tabla 14. Características resina fotopolimérica

8.2.2 Equipo utilizado

Para la fabricación de la pieza por SLA se ha utilizado una maquina FormLabs Form1+. [27]



Ilustración 67. Máquina FormLabs Form1+

Las características más significativas de este equipo son las siguientes;

- Tamaño de la impresora: 300x280x450 mm
- Tamaño máximo de impresión: 125x125x165 mm
- Espesor de capa: 25/50/100 micras
- Tipos de archivo admitidos: .stl, .obj
- Soportes: autogenerados de sencilla eliminación
- Temperatura de operación: 18-28 °C
- Especificaciones del láser: Certificación EN 60825-1:2007, producto láser de clase 1, láser violeta de 405 nm.
- Conectividad: USB
- S.O. compatibles: Windows XP+, Mac OSX 10.6.8+

8.3 Fabricación mediante mecanizado

Algunas de las piezas de unión más significativas han sido diseñadas para su fabricación mediante diversas técnicas de mecanizado

8.3.1 Material empleado

Los materiales empleados han sido diversos, estos han dependido del tipo de pieza a fabricar y a la disponibilidad de material por parte del taller en el que estas piezas han sido mecanizadas.

Para el eje principal de la maquinaria se ha utilizado aluminio, ya que el tamaño de la pieza y sus dimensiones así lo permitían. Del mismo modo, las barras del movimiento paralelo se han fabricado con el mismo material, ya que las dimensiones de estas facilitaban su ejecución con dicho material.

Los pasadores laterales instalados en el balancín han sido fabricados con acero para obtener mayor resistencia. Del mismo modo la pieza necesaria para la conexión del pistón y el depósito de agua se ha fabricado con el mismo material.

Los perfiles rectangulares usados en distintas partes del conjunto también tienen como materia el acero.

8.3.2 Equipo utilizado

Para la fabricación de todas las piezas de este apartado se han utilizado un torno, una fresadora y un taladro. Para los acabados o para operaciones intermedias se han usado también una muela, una tronzadora etc.

8.3.3 Piezas fabricadas

Las piezas fabricadas mediante mecanizado son todos los ejes del balancín, tanto el principal que apoya en las columnas como los laterales de los que parten diversas piezas. Así mismo las barras encargadas del movimiento paralelo de Watt también han sido fabricadas mediante este método.

El eje principal fue previamente diseñado en CAD para así obtener las medidas precisas y necesarias para su ejecución. Este eje tiene distintos diámetros los cuales pertenecen a la sujeción diseñada para los tacos de madera y el propio diámetro del eje del balancín. El diámetro de las sujeciones se extiende hasta el balancín, sirviendo de esta forma de separador con el mismo. El diseño de este eje se realiza en dos piezas distintas que se unen mediante una rosca mecanizada en ambas piezas de métrica ocho.



Ilustración 68. Diseño 3D eje principal

Del mismo modo, las sujeciones creadas para los laterales del balancín, fueron previamente diseñadas para ajustarse con precisión a las medidas principales del balancín.

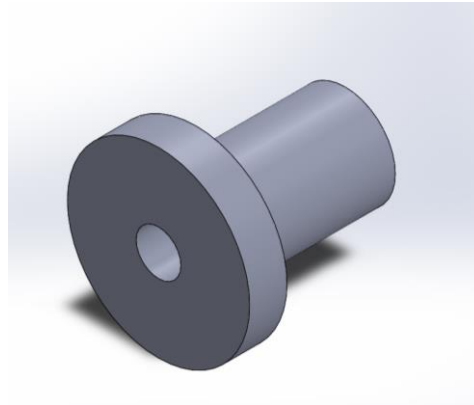


Ilustración 69. Diseño 3D sujeción lateral

Otra de las piezas a mecanizar diseñadas ha sido la unión entre el cilindro de la comba de agua, el depósito y la salida del agua. El funcionamiento de esta pieza se explicará posteriormente.

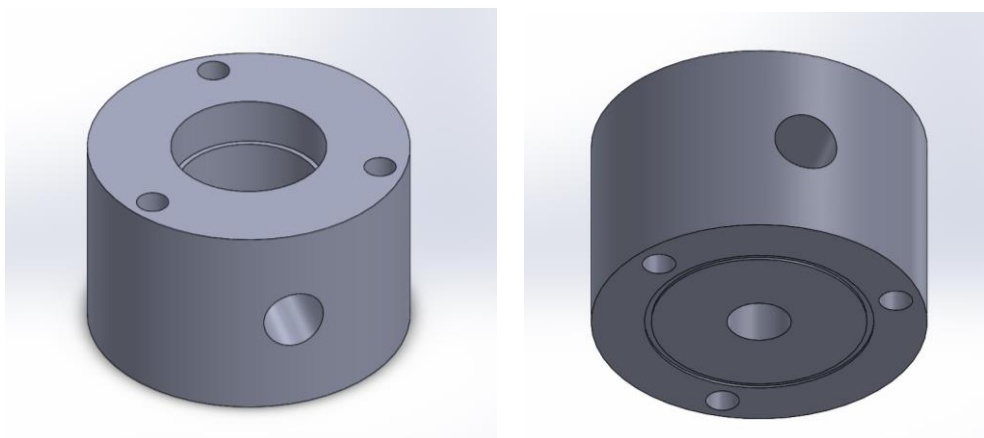


Ilustración 70. Diseño 3D unión bomba de agua

9. Montaje

9.1 Montaje neumático

El montaje neumático del conjunto se ha llevado a cabo a partir del diseño del siguiente circuito realizado con el soporte de FluidSIM, programa que permite el diseño y la simulación del conjunto, así como su ejecución y función.

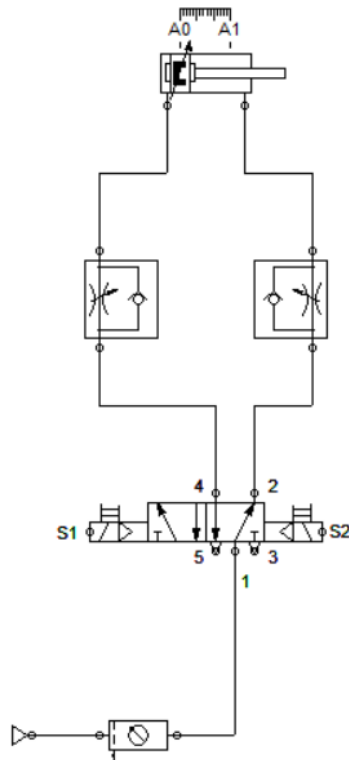


Ilustración 71. Esquema del montaje neumático

Elementos del circuito:

Símbolo	Elemento
	Cilindro de doble efecto
	Válvula reguladora de caudal unidireccional
	Electroválvula reguladora de 5/2 vías
	Fuente de aire comprimido con unidad de mantenimiento

Tabla 15. Elementos del circuito

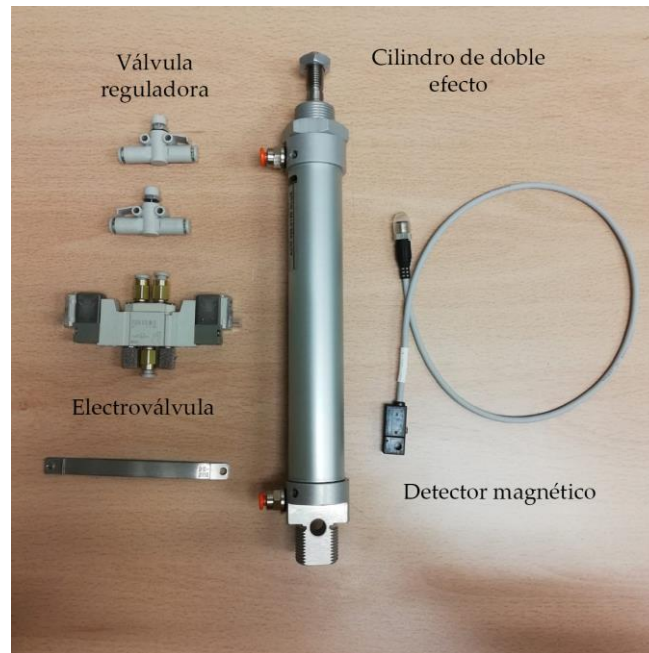


Ilustración 72. Elementos adquiridos para el circuito

El movimiento de vaivén continuo que se produce con el esquema anterior funciona de la siguiente manera: una vez se ponga el conjunto en funcionamiento mediante la admisión de aire comprimido, este pasa por la válvula distribuidora, para después pasar por el regulador de caudal, siendo este elemento el encargado de la velocidad a la que el pistón cambiará de posición. Una vez pasa el aire al pistón, este se desplaza hasta llegar a uno de los finales de carrera, en el esquema A0 y A1. Estos sensores mandan un impulso eléctrico que conecta con la electroválvula, haciendo cambiar esta de posición, lo que supone el cambio de entrada y salida de aire al pistón, produciendo el movimiento del mismo en sentido opuesto al movimiento anterior. Esto se produce de forma continua y así se realiza el movimiento de vaivén del pistón.

Para el correcto funcionamiento de la válvula distribuidora, se necesita también un circuito eléctrico.

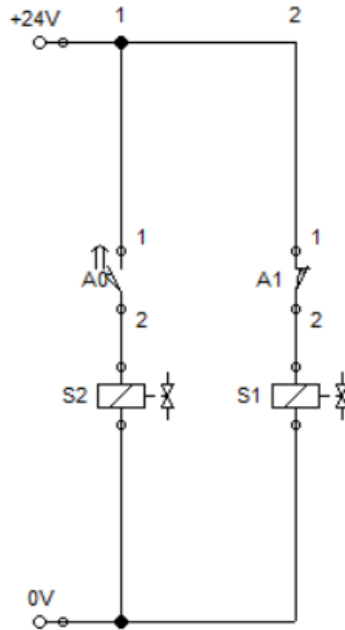


Ilustración 73. Esquema del circuito eléctrico

En este circuito tenemos la fuente de alimentación a 24 v, así como como los detectores de posición que abren o cierran el circuito dependiendo de la posición del pistón. El solenoide de la válvula (S1 y S2) conmuta dicha válvula para que esta cambie de posición. [20]

9.2 Montaje mecánico

Para realizar el montaje de las partes mecánicas del prototipo, se ha comenzado con la construcción de los pilares que son sujeción del balancín, así como de una base principal donde estos pilares están anclados.

Como base se ha utilizado aglomerado, cortado a las medidas necesarias para todo el montaje del prototipo.

Para los pilares principales de la casa tipo Cornish, se han reutilizado tacos de madera de pallets que han sido cortados a una longitud de 60 cm, longitud necesaria para la incorporación de todos los elementos del prototipo. A estos mismos pilares, se le han realizado una cavidad de 45 mm de profundidad en la parte superior de los mismos, utilizando para ello un martillo y un cincel, con objeto de anclar en dicha

cavidad las vigas de la casa Cornish, diseñadas para la sujeción de una de las barras del movimiento paralelo de Watt.

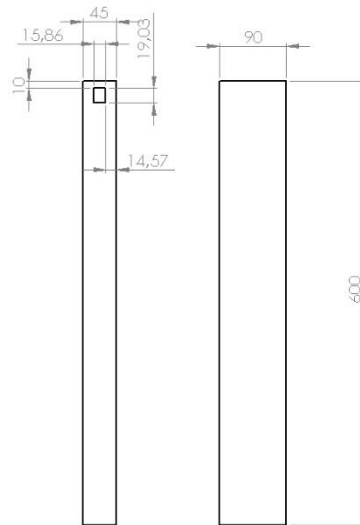


Ilustración 74. Esquema pilares de madera del prototipo

Para conferirle mayor estabilidad a la estructura y evitar problemas derivados a la falta de ella en un futuro, se han atornillado dos tacos pequeños de madera como separadores entre las dos columnas, uno en la base y otro en la parte superior para no interferir con ninguno de los elementos. Estos tacos se han obtenido de la parte restante que fue cortada de los pallets con las medidas necesarias para la separación de las dos columnas. Por último, esta estructura se atornilla a la base, resultando un conjunto bien fijado y muy estable para la colocación del resto de los elementos.



Ilustración 75. Montaje de la base y los pilares del prototipo

Tras la fabricación de la estructura principal, se ha procedido a la colocación de las piezas que son sujeción del eje principal en el que se encuentra el balancín. Estas piezas fueron diseñadas con las medidas adecuadas para su colocación sobre los pilares de madera. Para su colocación y fijación se ha usado silicona y además estas piezas se han atornillado a la madera haciendo uso de los agujeros diseñados previamente en dichas piezas. Posteriormente se ha procedido a la colocación del eje principal y al balancín.



Ilustración 76. Montaje de balancín y su eje

Una vez se haya colocado el balancín, se han instalado las vigas en las cavidades creadas para ello. Estas han sido encajadas hasta la profundidad especificada, sirviendo como guía unas muescas diseñadas previamente en la pieza para una mayor exactitud.

El siguiente paso que ha sido dado es la colocación de las barras encargadas del movimiento paralelo. Para la unión de estas entre sí y con el propio balancín, se han usado varillas roscadas de 5 mm de diámetro. Debido a ello, los agujeros del balancín se han agrandado mediante un taladrado a las medidas necesarias. De la misma forma, a los pasadores laterales del balancín diseñados y fabricados para las partes más exteriores del mismo, así como a las propias barras también se les ha taladrado unos agujeros de 5 mm de diámetro. En el caso de las barras, el centro de estos taladros se encuentra a 5 mm de la arista exterior.

La unión de las vigas con las barras sin embargo se ha hecho con varilla roscada de 4 mm de diámetro debido al agujero que presentaban estas vigas previamente impresas con PLA. Estos agujeros tenían una dimensión cercana a 4 mm y haberlos taladrado a 5 mm podría haber supuesto la rotura o la formación de una grieta en la pieza ya que la misma no está rellena en su totalidad, sino que interiormente presenta un patrón de relleno.

Para separar todos los elementos entre si y que estos no cambien de posición durante el funcionamiento de la maquinaria, se han colocado pequeñas piezas a modo de separador. Estas piezas han sido cortadas de un tubo cuyo diámetro interior es lo suficientemente grande como para que las varillas roscadas puedan atravesarlo.

A continuación, se ha colocado el pistón, ya que parte de las barras están conectadas al mismo. Para la colocación de este elemento sobre la base principal, se ha optado por la fabricación de una estructura metálica que proporcione la correcta estabilidad y fijación sobre dicha base, ya que este elemento es el que proporciona el movimiento y la fuerza a todo el conjunto. Previamente se ha limado y se ha hecho un taladro en la parte sobresaliente del vástago para la unión con las barras del movimiento paralelo, así como se ha cortado la parte sobresaliente tras el taladro con una finalidad estética.

Esta estructura está formada por perfil rectangular de acero, cortado mediante una tronzadora industrial a la longitud deseada. Para cerrarlo, se han soldado dos chapas en ambos lados del perfil que han sido previamente trabajadas. A la chapa de la parte inferior se le han hecho dos taladros, por los cuales pasarán dos tornillos para anclar la estructura a la base de aglomerado. En la chapa de la cara superior se ha perforado un orificio mediante un torneado en varias fases, para a continuación hacer un roscado igual al del pistón neumático. Una vez soldadas las chapas, se atornilla la estructura a la base.



Ilustración 77. Estructura de sujeción del pistón

A continuación, se rosca el pistón a la estructura metálica y se aprieta haciendo uso de la tuerca incorporada con la compra del pistón que ejerce de contratuerca. Gracias a dicha tuerca el pistón queda totalmente fijado y además se ha podido elegir la posición final del mismo en la estructura, pudiéndose quedar la entrada de aire del mismo en parte posterior, siendo posible de esta forma enmascarar los tubos de aire y sus accesorios.

Finalmente se ha unido el pistón y las barras del movimiento paralelo con las mencionadas varillas roscadas. El resultado puede observarse a continuación.



Ilustración 78. Montaje pistón y barras movimiento paralelo

La siguiente fase del montaje pasa por la fabricación de una bomba de agua que realice las mismas funciones que las bombas impelentes que se hallaban en las minas donde la maquina Cornish extraía el agua.

La fabricación de esta bomba de agua ha sido planteada con diferentes soluciones, las cuales han dado diferentes problemas logísticos para su construcción. Finalmente se ha optado por una fabricación a partir de un amortiguador hidráulico usado de coche. Dicho amortiguador consta de un cilindro y un pistón, construido de tal forma que la succión de agua es posible.

Para la construcción total de la bomba de agua impelente ha sido necesaria la fabricación de una pieza que haga de unión con todos los elementos necesarios para ello. Dicha bomba constará del pistón para succionar y expulsar agua, una válvula antirretorno conectada con el deposito que solo permita la succión, y otra válvula antirretorno que solo permita la expulsión de agua. Para conectar todos estos elementos, se ha fabricado una nueva pieza, algunas de cuyas dimensiones principales se muestran a continuación.

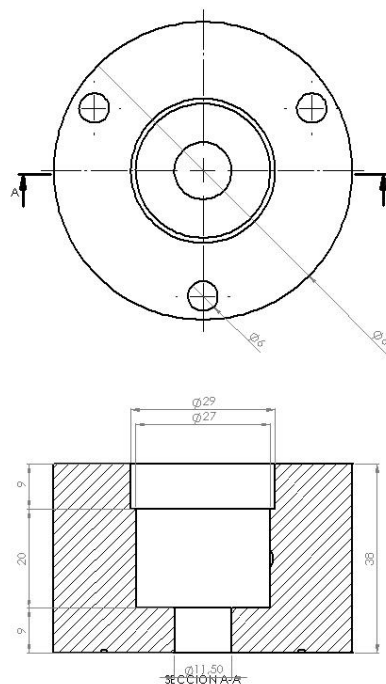


Ilustración 79. Esquema pieza de unión

Esta pieza se ha unido al depósito mediante tres taladros, y para una unión más estanca se ha colocado una junta tórica. En primer lugar, el cilindro se une por presión a dicha pieza, ya que la cavidad realizada a la misma permite este tipo de unión. Para fijarla bien, esta unión por presión se realiza mediante una prensa hidráulica manual, teniendo para ello mucho cuidado y esmero con el objeto de que esta se haga totalmente perpendicular y no se pueda dañar el cilindro. Posteriormente, para una perfecta unión, se ha realizado un cordón de soldadura TIG entre ambas piezas.



Ilustración 80. Montaje pieza de unión con el cilindro

Para la unión de la pieza con las válvulas antirretorno, se ha colocado una válvula de conexión con rosca, cuyo roscado para la conexión ha sido creado en dicha pieza. Tras esta válvula se coloca la válvula antirretorno por medio de un tubo de pequeña longitud. Para un total ajuste de dicho tubo y evitar que se desplace, se colocan dos alambres fuertemente fijados entre el tubo y las válvulas.



Ilustración 81. Conexión de válvulas con la bomba

El siguiente elemento que se ha creado ha sido el depósito de agua. Este se ha fabricado a partir de un perfil de chapa, al que se le han practicado tres taladros, uno para conectar la bomba fabricada con dicho depósito, otro para la recepción del líquido aspirado y el último para la colocación de un tornillo al que posteriormente se le ha perforado un agujero cuya función es actuar como respiradero. A este perfil de chapa se le han soldado dos chapas en los laterales para que este se convierta en depósito estanco y pueda albergar líquido en su interior.

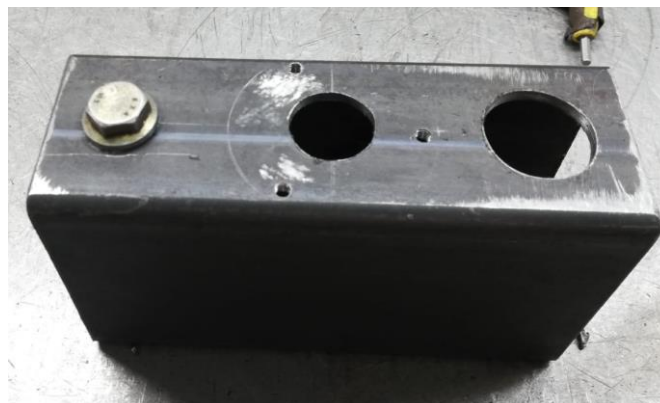


Ilustración 82. Depósito de agua

Este depósito se ha soldado a una chapa metálica a la que se le han perforado una serie de orificios para ser posteriormente atornillada a la base de la maqueta. Tras ello, se atornilla la bomba de agua al depósito para seguir con el montaje del prototipo.



Ilustración 83. Unión de la bomba al depósito de agua

El ensamblaje del pistón de la bomba de agua con el balancín se hace por medio de una varilla conectada con el mismo. Aunque en las máquinas originales no se realizaban articulaciones, o no hay constancia de ello, en esta ocasión se ha optado por realizar una articulación entre la varilla y el vástago del pistón con objeto de no crear fuerzas que pudiesen perjudicar a ningún elemento de la maqueta. Para ello, se ha limado una parte de la superficie cilíndrica del vástago del pistón de forma simétrica y se ha realizado una hendidura en la varilla de tales dimensiones que la parte limada del vástago penetre en ella. Posteriormente se le ha realizado un taladrado de la misma dimensión a ambas piezas y se unen por medio de una varilla roscada y sus correspondientes tuercas, permitiendo de esta forma el movimiento entre ambas piezas.



Ilustración 84. Detalle articulación entre la varilla y el vástago de la bomba

Finalmente se une la varilla al balancín por medio de un taladro y se colocan dos tubos entre este y la varilla a modo de separadores.

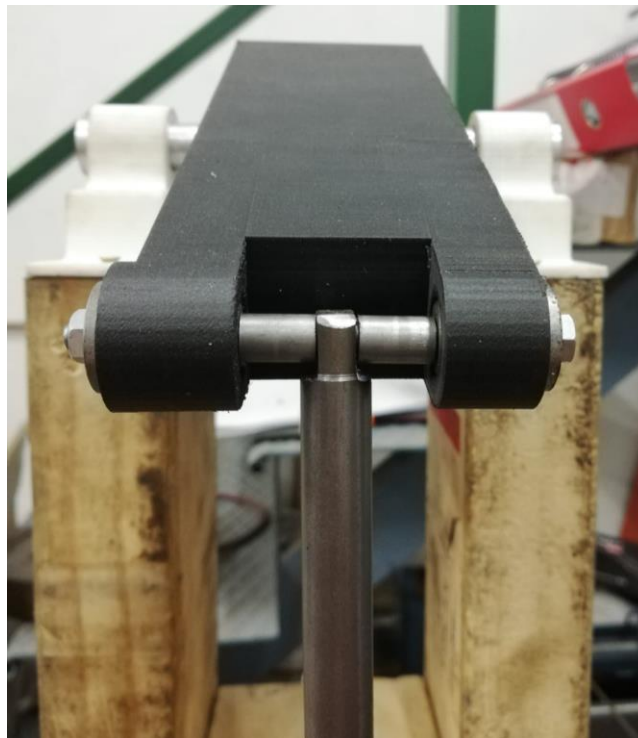


Ilustración 85. Unión de la varilla con el balancín

Finalmente se ha creado un pequeño circuito por donde el líquido aspirado pasara para volver al mismo depósito y de esta forma evitar tener que ir rellenándolo. Este circuito parte de la salida de la válvula antirretorno con un tubo de plástico para después ser empalmado a un tubo metálico que estéticamente mejora el resultado y

su rigidez nos permite modelarlo fácilmente a nuestro gusto. Este tubo metálico se ha anclado a los pilares de madera con unas alcayatas para una buena fijación y se ha modelado la parte final para que expulse el líquido en un tubo de plástico evitando así salpicaduras innecesarias. De este modo el montaje mecánico estaría completado.

10. Prototipo final

Una vez se ha terminado el montaje mecánico, se ha procedido a embellecer la maqueta para un buen acabado estético. De esta forma se han forrado los pilares de madera, así como la plataforma principal con papel adhesivo cuyo estampado simula la madera.

De forma análoga se han creado unas plataformas que sirven de recubrimiento, así como de base para la colocación del resto de los elementos impresos. Estas plataformas han sido forradas con papel adhesivo al igual que los elementos anteriores.

Por otra parte, se han pintado el depósito de agua, los tubos metálicos y algunas de las piezas impresas con PLA con esmalte laca satinado.

A partir de aquí, se han conexionado los elementos eléctricos y neumáticos del pistón a la maqueta, teniendo especial cuidado en la colocación de los sensores, ya que, debido al recorrido de la bomba de agua, la carrera del pistón tiene que ser acertada en unos centímetros.

Con la comprobación del funcionamiento del prototipo, se han cortado los cables o tubos excedentes y se han fijado a la sujeción del pistón con el objeto de enmascarar estos mismos e intentar que se vean el mínimo posible.

El resultado final se puede observar en la siguiente imagen:



Ilustración 86. Prototipo final

11. Optimización de piezas impresas

Al finalizar el montaje del prototipo y obtenerse los datos de fuerza ejercidos por el pistón sobre el balancín, se puede estimar un ahorro de material de impresión sobre algunas de las piezas con la optimización que se lleva a cabo sobre el mismo haciendo uso del programa Autodesk Fusion 360.

Autodesk Fusion 3D una herramienta de diseño 3D que integra varias herramientas para realizar distintos tipos de simulaciones como la optimización de geometría de la que se ha hecho uso para este apartado. En esta simulación se optimizan las piezas para que sean ligeras y estructuralmente eficientes en función de las cargas y las condiciones de contorno aplicadas a la geometría. [28]

El principal elemento al que se le ha aplicado esta simulación de optimización es al balancín, ya que se trata de la pieza con mayores dimensiones del conjunto. Para introducir la pieza en el programa y que esta se optimice de forma correcta, debemos introducir la pieza como maciza por lo tanto esta se ha modificado para ello en SolidWorks. Para el modelado de la pieza maciza se han tenido en cuenta los huecos que hay que proporcionar para poder colocar posteriormente las piezas que van unidas al balancín siendo este el modelado elegido para ello.

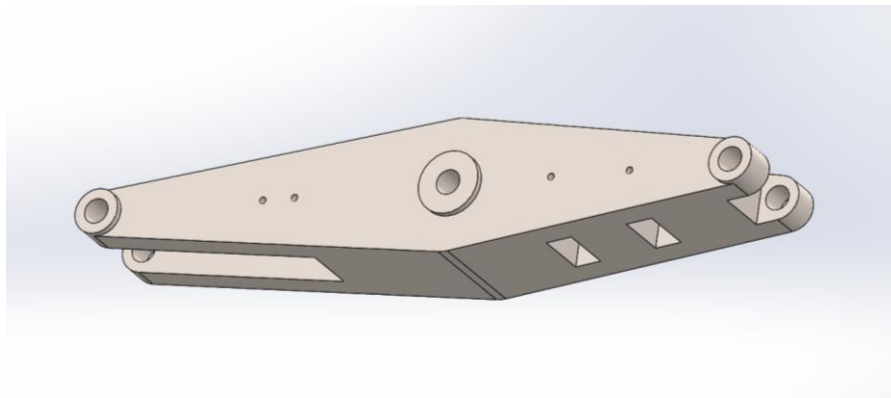


Ilustración 87. Modelado 3D macizo balancín

Con la importación de la pieza en Fusión 360, seleccionamos la simulación elegida, siendo en este caso la simulación Shape Optimization, y modificamos los parámetros requeridos para llevarla a cabo. Los parámetros a modificar son el material de la pieza, las cargas a las que está sometido el balancín, las restricciones estructurales y las zonas que queremos conservar de la misma.

En primer lugar, comenzaremos con la creación de un nuevo material, ya que la fibra de nylon reforzada con fibra de carbono no viene por defecto en la galería de materiales del programa. Para ello utilizaremos el Nylon como material base para posteriormente modificar parámetros como la densidad entre otros.

A continuación, se le asignaran las cargas a las que estará sometida la pieza. Para ello habrá primero que definir las restricciones estructurales en este caso la fijación se hará en el extremo derecho del balancín, al igual que se hizo para el análisis mecánico de esta misma pieza, que es el extremo donde se aplica la fuerza de oposición al movimiento. Del mismo modo se establece el punto de apoyo que es el eje del balancín, eligiéndose la opción de Pin dentro de las restricciones estructurales, que permite el movimiento axial pero no el radial o el axial.

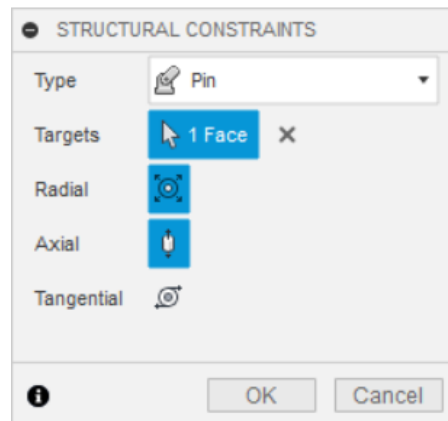


Ilustración 88. Detalle restricción estructural en Fusión 360

La presión mínima que requiere la maqueta para su funcionamiento es de 1,5 bar, por lo que las fuerzas que soportan el balancín se estimaran a partir de este valor y teniendo en cuenta el área del pistón donde se ejerce la fuerza.

Diámetro del pistón: 25 mm

Presión del aire comprimido: 150000 Pa

El área del pistón será: $A = \pi \cdot \frac{D^2}{4} = \pi \cdot \frac{0,025^2}{4} = 4,909 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$

La fuerza ejercida sobre el pistón será:

$$F = P \cdot A = 150000 \text{ Pa} \cdot 4,909 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 73,63 \text{ N}$$

Teniendo en cuenta que un momento M se puede expresar como una fuerza por una distancia, y teniendo en cuenta que las distancias al eje del balancín escalado son 20,24 cm (d_{interna}) y 16,215 cm (d_{externa}) respectivamente tendremos:

$$F_{\text{vapor}} \cdot d_{\text{interna}} = F_{\text{opositora}} \cdot d_{\text{externa}}$$

Despejamos el valor de la fuerza opositora para que el equilibrio en ese punto exista:

$$F_{\text{opositora}} = \frac{F_{\text{vapor}} \cdot d_{\text{interna}}}{d_{\text{externa}}} = \frac{73,63 \text{ N} \cdot 20,24 \text{ cm}}{16,215 \text{ cm}} = 91,907 \text{ N}$$

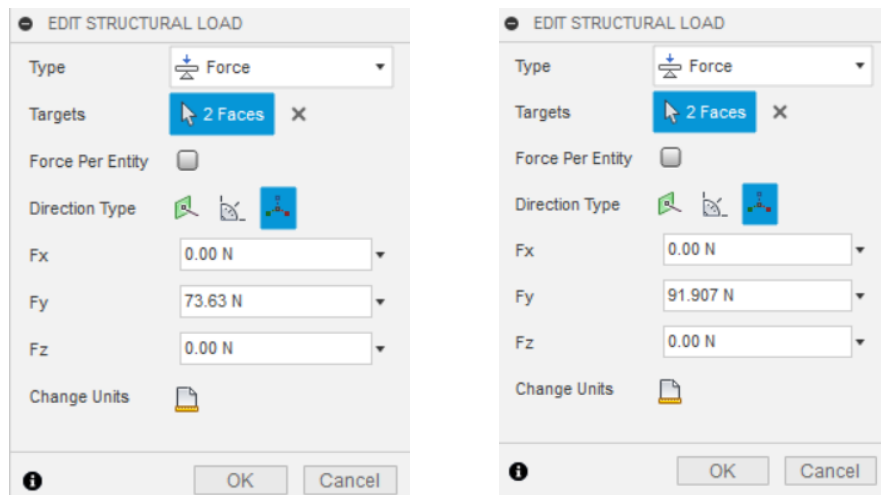


Ilustración 89. Aplicación de fuerzas al modelo en Fusión 360

Finalmente elegimos las zonas que queremos conservar del modelo base. Para ello se ha elegido conservar la forma principal del balancín, por tanto, se conservan los bordes principales del mismo. Del mismo modo se conservan todos los taladros del balancín, ya que son necesarios para el ensamblaje de esta pieza con otras del prototipo.

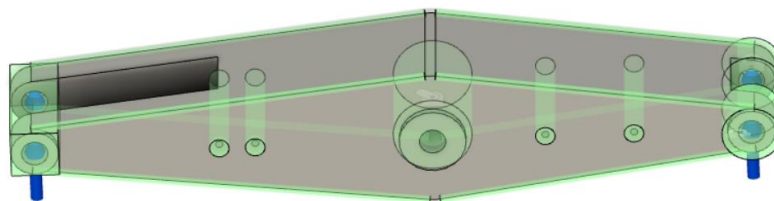


Ilustración 90. Zonas a conservar en el modelo base en Fusión 360

Una vez se hayan impuesto todas las condiciones para llevar a cabo la simulación se modifica la malla para una solución más aproximada y se ejecuta la misma, tras ello se observan los resultados. Estos resultados nos indican que zonas del modelo se deben conservar de la forma más óptima atendiendo a los parámetros introducidos, así como la criticidad de la ruta de carga a través de un mapa de color. Así mismo se muestra el peso aproximado del modelo y el porcentaje de material conservado.

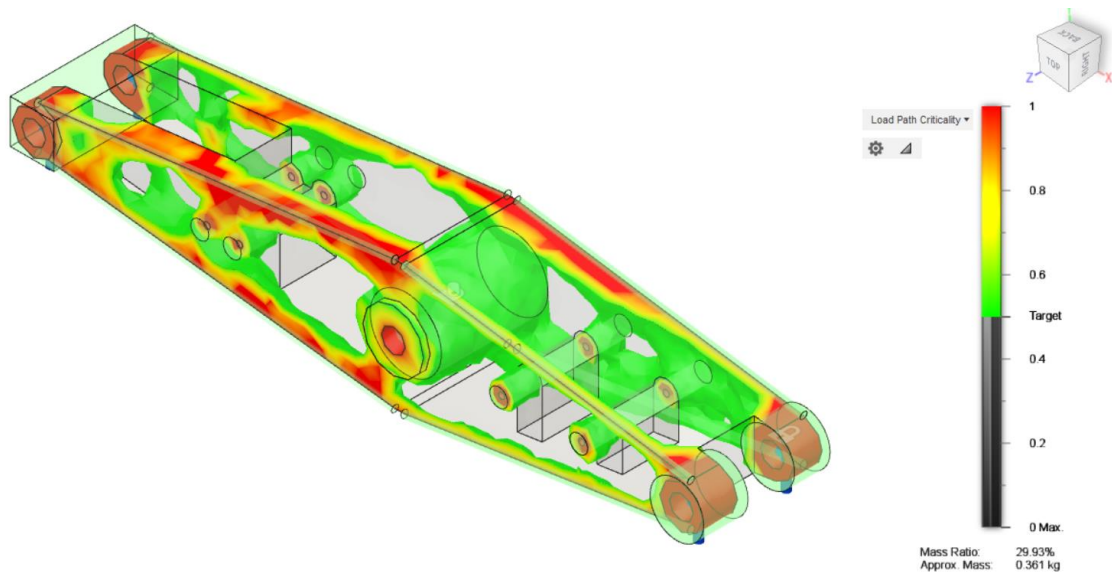


Ilustración 91. Resultado de la optimización del balancín

Por otra parte, se puede modificar la cantidad de material empleado a partir de la barra deslizante llamada *Target*, no siendo recomendable su reducción, sino en todo caso su aumento. Sin embargo, en primer lugar, se comprobará con los resultados anteriores.

Una vez hayamos obtenido estos resultados, procedemos a la sección “Promote”, donde los cortes necesarios se han extruido para obtener la pieza lo más similar posible a los resultados del mapa de color obtenido.

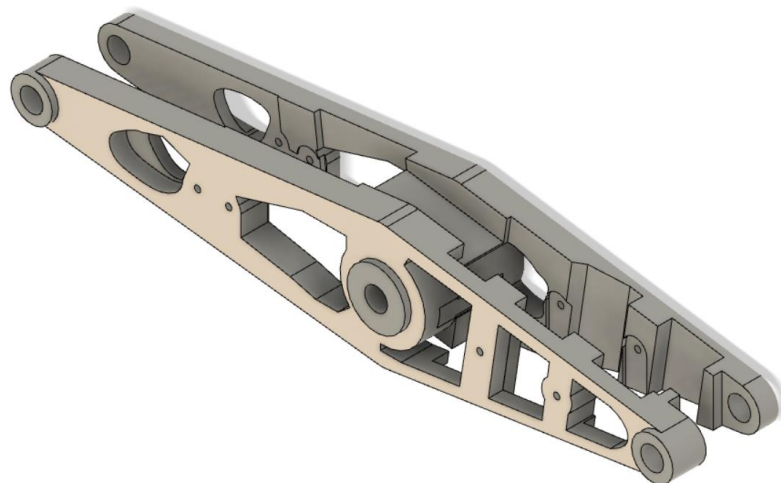


Ilustración 92. Resultado de la eliminación de material

Por último y para asegurarnos de que la pieza ya creada soportará las cargas a la que será sometida, se ha procedido a un estudio de tensión estática con este mismo

programa. Este estudio analiza la deformación y la tensión en el modelo a partir de cargas estructurales y restricciones. A partir de los resultados obtenidos, se puede investigar el desplazamiento, las tensiones y los criterios comunes de falla. Los resultados se calculan en función de la suposición de respuesta lineal al estrés.

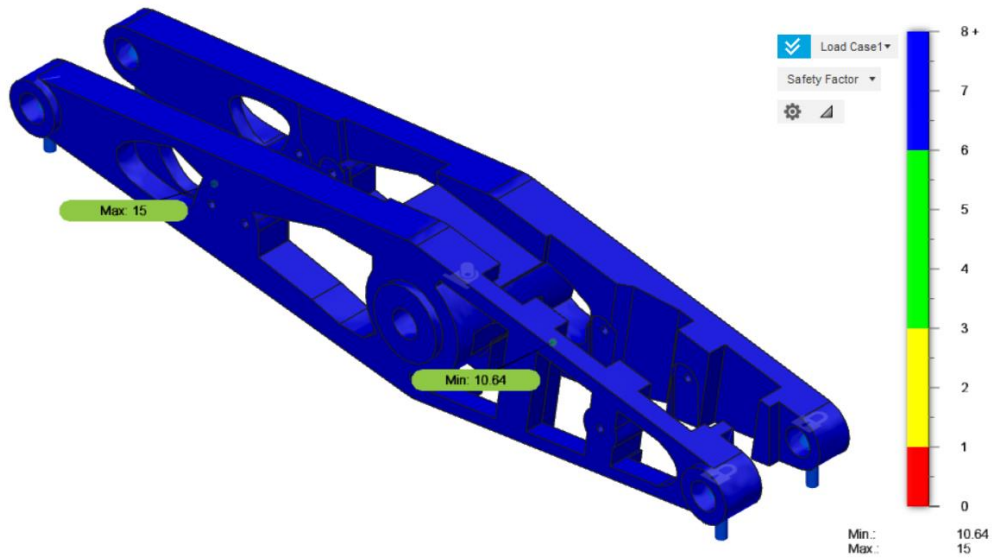


Ilustración 93. Resultado en factor de seguridad

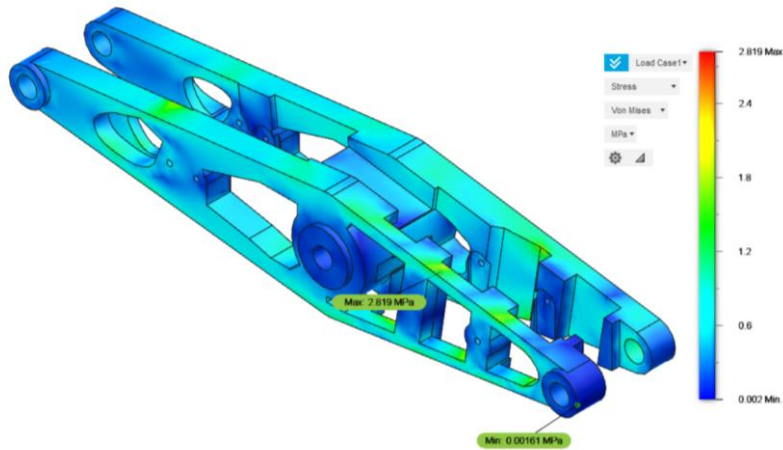


Ilustración 94. Resultado de la tensión

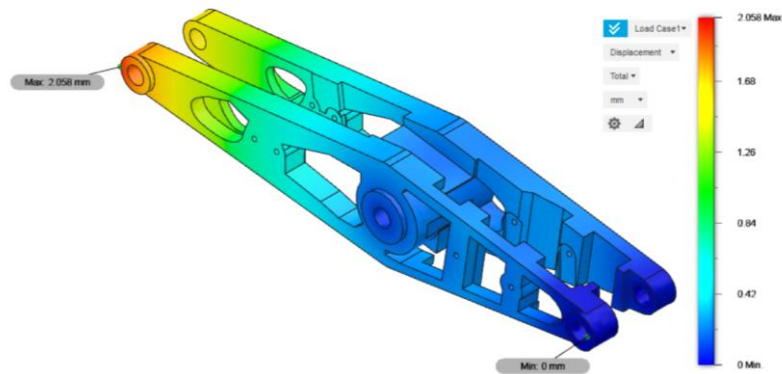


Ilustración 95. Resultado del desplazamiento

Como puede observarse en la ilustración 92, el coeficiente de seguridad mínimo obtenido es superior a 10, por lo que como se observa en las imágenes siguientes, no obtendremos problema alguno relacionado con la tensión o desplazamiento. Esto significaría que se podría reducir aún más el material del balancín.

Con objeto de mejorar la apariencia física y estética del balancín, se ha creado una segunda propuesta, eliminando en Solidworks el material innecesario estéticamente de la mejor forma posible.

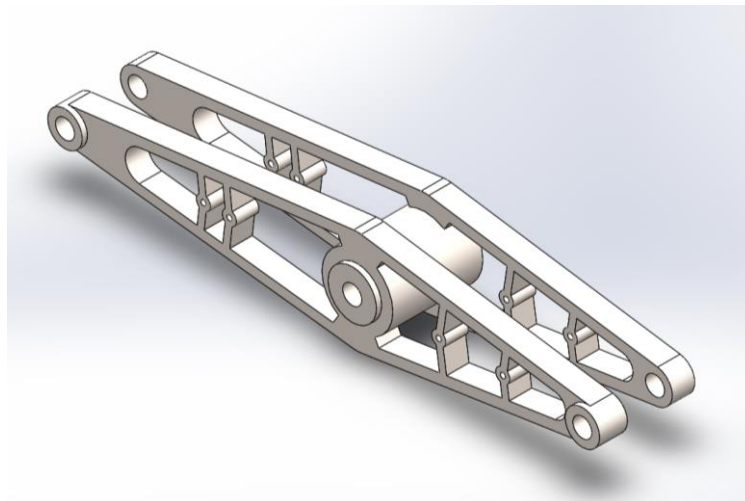


Ilustración 96. Propuesta de mejora estética para el balancín

Llegados a este punto, se han realizado los mismos estudios que en el caso anterior, siendo el primero de ellos la optimización del material para comprobar si se pueden hacer más eliminaciones.

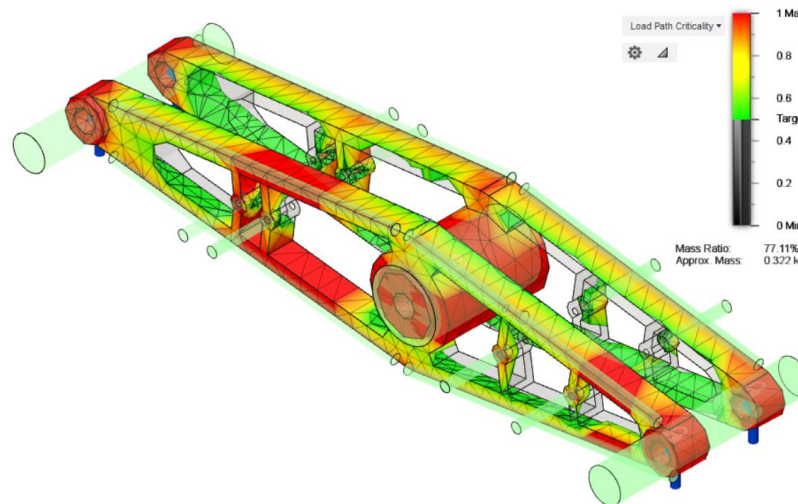


Ilustración 97. Resultado de la segunda optimización de material

Comprobamos de esta forma, que el 77,11% de nuestra propuesta es totalmente necesario, por lo que el modelo se acerca mucho a su punto óptimo. Tras esto en la sección *Promote*, se ha eliminado una parte del material innecesario, obteniéndose el siguiente modelo final:

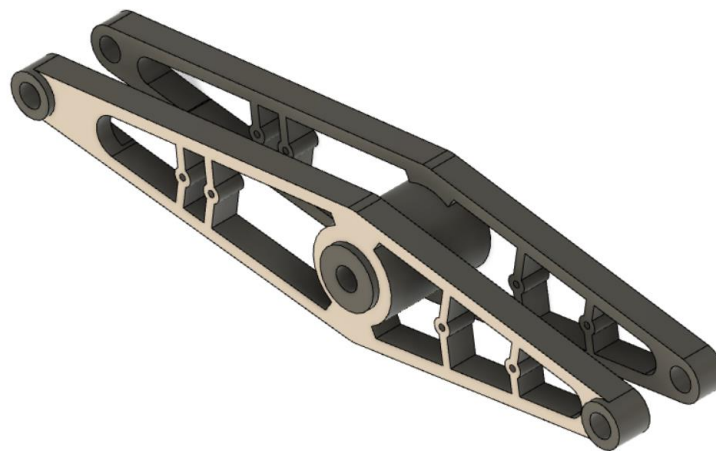


Ilustración 98. Modelo optimizado final

Por último, se le realiza el análisis estático para comprobar que no habrá problemas con las cargas que el balancín sufrirá.

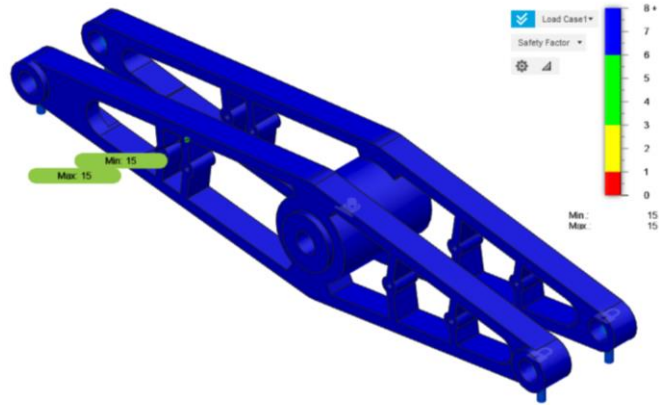


Ilustración 99. Resultado final del coeficiente de seguridad

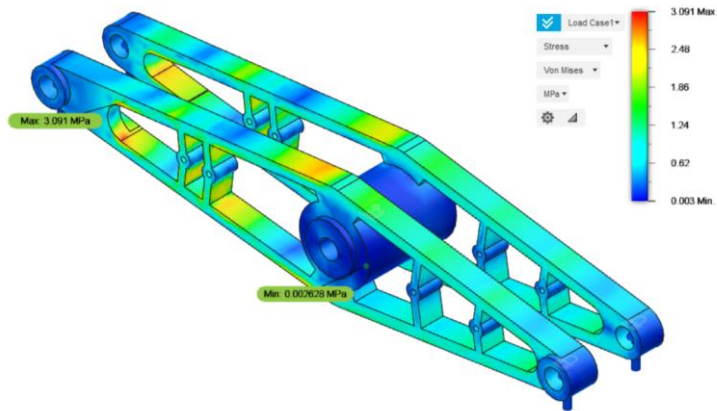


Ilustración 100. Resultado final de la tensión

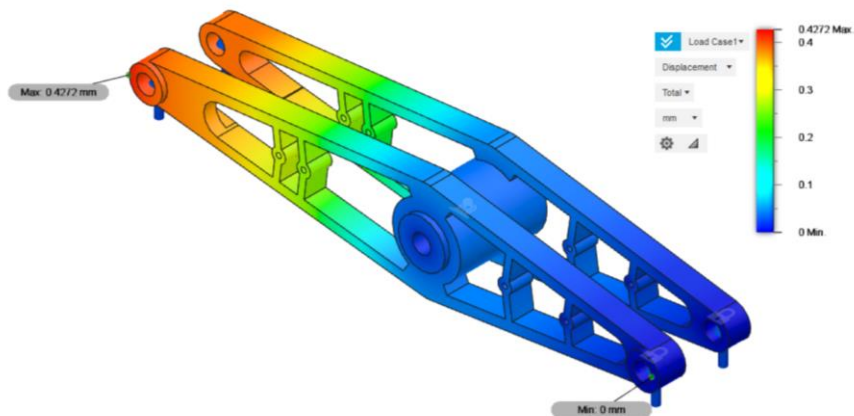


Ilustración 101. Resultado final del desplazamiento

Se comprueba de esta forma que la optimización de la pieza no presentaría problema alguno y que se obtendría un ahorro de material total del 64,42% ya que la pieza inicial tendría un peso de 1,158 kg y la final de 0,412 kg.

12. Conclusión y trabajos futuros

Este trabajo se ha desarrollado aplicando los conocimientos de diferentes áreas de la ingeniería, adquiridos durante el estudio del master universitario. Se han usado conocimientos de la rama mecánica y termodinámica, así como de la rama de automatización.

Los conocimientos aplicados de la rama de la ingeniería mecánica han sido muy diversos entre sí, ya que el trabajo consta de una parte de diseño y análisis, una parte de fabricación del prototipo y otra parte de análisis termodinámico.

Con este trabajo también se ha podido profundizar en aspectos técnicos y de funcionamiento de la maquina Cornish, máquina muy importante en su fecha y que trajo con su instalación en la provincia de Jaén grandes cambios, impulsando la revolución industrial de la provincia.

A lo largo de este proyecto se han podido visualizar futuros trabajos para la mejora de la maqueta que podrán ser objeto de investigación por parte de los alumnos como trabajo futuro. Uno de ellos sería la posibilidad de sustituir el presente circuito neumático del pistón por la construcción de un cilindro capacitado para su funcionamiento mediante un calderín de vapor. Así mismo, se podría profundizar en el aprendizaje del accionamiento de las válvulas de dicho cilindro, así como su reproducción o construcción a una escala pertinente.

De esta forma se abren nuevas vías de investigación a una maquinaria que revolucionó la economía de la provincia de Jaén, así como de su zona de origen Cornwall.

Bibliografía

- [1] M. Pérez, *Inicio de la revolución industrial en Jaén. Máquina de vapor Cornish y aplicaciones.*, Universidad de Jaén, 2017.
- [2] H. W. Dickinson, *A Short History of the Steam Engine*, Cambridge University Press, 1664.
- [3] «HyperPhysics,» Georgia State University, 2017. [En línea]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>.
- [4] Society for promoting Christian knowlege, *El instructor*, volumen IV, Londres, 1837.
- [5] «El Blog de la Ingeniería,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.elblogdelaingenieria.com/james-watt-la-maquina-de-vapor/>.
- [6] R. Polwhele, *The History of Cornwall*, vol II, Londres, 1834.
- [7] A. C. P. Arrayanes, «Proyecto Arrayanes,» [En línea]. Available: https://www.proyectoarrayanes.org/revolucion_tecnologica.php.
- [8] W. Pole, *A Treatise On the Cornish Pumping Engine*, Londres, 1844.
- [9] C. Pameley, *The Colliery Manager's Handbook*, Londres: Crosby Lockwood and Son, 1891.
- [10] Mizar, 2016. [En línea]. Available: <http://mizaradditive.com/impresion-3d/>.
- [11] Y.-G. J. Jing, *Additive Manufacturing: Materials, Processes, Quantifications and Applications*, Butterworth-Heinemann, 2018.
- [12] C. K. Chua y K. F. Leong, *3D Printing and Additive Manufacturing*, Singapur, 2017.
- [13] Fundacion Cotec para la innovación tecnológica, *Fabricación Aditiva*, Madrid: Gráficas Arias Montano, 2011.
- [14] 3D Natives, «3D Natives,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/>.
- [15] HXX, «HXX,» 6 Diciembre 2014. [En línea]. Available: <http://hxx.es/2014/12/06/tecnologias-de-impresion-3d-fotopolimerizacion/>.
- [16] SuperredTV, «100Cia,» 10 Mayo 2018. [En línea]. Available: <https://www.100cia.site/index.php/fisica/item/14522-que-es-la-estereolitografia>.
- [17] «Schrodinger Koneko,» Enero 2019. [En línea]. Available: <https://schrodingerkoneko.blogspot.com>.
- [18] «ResearchGate,» Diciembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.researchgate.net>.

- [19] E. Paul deGarmo, J. Temple Black y R. A. Kohser, Materiales y procesos de fabricación, Volumen 1, Reverte, 1988.
- [20] J. C. Vásquez Cortés, Automatización electroneumática, Ediciones de la U, 2016.
- [21] «Filament2Print,» [En línea]. Available: <https://filament2print.com>.
- [22] «TR3SDLAND,» Junio 2016. [En línea]. Available: <https://www.tr3sdland.com>.
- [23] «Markforged,» [En línea]. Available: <http://static.markforged.com>.
- [24] «BQ,» [En línea]. Available: <https://www.bq.com/es/>.
- [25] A. Lalani, «ALL3DP,» Noviembre 2019. [En línea]. Available: <https://all3dp.com>.
- [26] J. Mazcuñán, *Guía de diseño para impresión 3D*, 2016.
- [27] «FormLabs,» [En línea]. Available: <https://formlabs.com/>.
- [28] «Autodesk,» [En línea]. Available: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>.

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Esquema máquina Savery	5
Ilustración 2. Esquema máquina Newcomen.....	6
Ilustración 3. Esquema máquina Watt	7
Ilustración 4. Esquema máquina Cornish	8
Ilustración 5. Casa de calderas Cornish	10
Ilustración 6. Maquina tipo Cornish.....	12
Ilustración 7. Recubrimiento del cilindro	14
Ilustración 8. Cilindro	15
Ilustración 9. Movimiento paralelo de Watt	16
Ilustración 10. Balancín tipo Cornish	17
Ilustración 11. Puerto superior de válvulas	18
Ilustración 12. Puerto inferior de válvulas	20
Ilustración 13. Sección de válvula	21
Ilustración 14. Esquema de la catarata.....	22
Ilustración 15. Condensador y bomba de aire	25
Ilustración 16. Bomba de aire	26
Ilustración 17. Vástago.....	27
Ilustración 18. Esquema bombas y depósitos de agua.....	31
Ilustración 19. Ciclo teórico general.....	32
Ilustración 20. Ciclo teórico maquina Cornish.....	32
Ilustración 21. Esquema simplificado del sistema de válvulas	33
Ilustración 22. Captura de pantalla del programa TermoGraf. Propiedades termodinámicas del punto A.....	36
Ilustración 23. Diseño 3D del cilindro.....	45
Ilustración 24. Diseño 3D del balancín	45
Ilustración 25. Diseño 3D del vástago	46
Ilustración 26. Herramientas usadas en Solidworks	46
Ilustración 27. Diseño barras paralelogramo de Watt	47
Ilustración 28. Esquema principal maquinaria	48
Ilustración 29. Diseño 3Dparalelogramo de Watt.....	48
Ilustración 30. Diseño 3D catarata.....	49
Ilustración 31. Diseño 3D catarata.....	49
Ilustración 32. Selección de material en SolidWorks	51
Ilustración 33. Fijación punto de apoyo SolidWorks.....	52
Ilustración 34. Direccion de fuerzas ejercidas en el balancín.....	52
Ilustración 35. Resultados análisis Von Mises	53
Ilustración 36. Resultados desplazamientos resultantes.....	53
Ilustración 37. Resultados deformación unitaria equivalente	54
Ilustración 38. Esquema inyección de aglutinante	57
Ilustración 39. Esquema estereolitografía.....	59
Ilustración 40. Esquema Polyjet	60
Ilustración 41. Esquema deposición de hilo fundido	61
Ilustración 42. esquema fusión de lecho de polvo	62
Ilustración 43. Diámetro y carrera de pistón disponibles para serie ISO 6432	66
Ilustración 44. Diseño principal del pistón.....	66
Ilustración 45. Esquema de la electroválvula.....	67

Ilustración 46. Esquema montaje del detector magnetico en el pistón.....	68
Ilustración 47. Circuito de protección de contactos.....	69
Ilustración 48. Esquema del regulador de caudal.....	70
Ilustración 49. Impresora 3D BQ Witbox.....	73
Ilustración 50. Impresora 3D Markforged Onyx Pro Gen 2.....	74
Ilustración 51. Parámetro espesor de pared.....	75
Ilustración 52. Parámetro roscado.....	76
Ilustración 53. Diseño 3D del cilindro para impresión.....	76
Ilustración 54. Diseño conjunto de puertos de válvulas y tubería de educación.....	77
Ilustración 55. Resultado de impresión conjunto de puertos de válvulas y tubería de educación.....	78
Ilustración 56. Resultado de impresión catarata.....	78
Ilustración 57. Modelado 3D balancín.....	79
Ilustración 58. Diseño 3D corte balancín.....	79
Ilustración 59. Características de impresión del balancín con PLA.....	80
Ilustración 60. Balancín impreso, vista 1.....	80
Ilustración 61. Balancín impreso, vista 2.....	80
Ilustración 62. Condensador impreso.....	81
Ilustración 63. Sujeción del eje principal impresa.....	81
Ilustración 64. Viga principal impresa.....	81
Ilustración 65. Características de impresión del balancín con fibra Onyx.....	82
Ilustración 66. Resultado impresión de bomba de aire.....	83
Ilustración 67. Máquina FormLabs Form1+.....	84
Ilustración 68. Diseño 3D eje principal.....	86
Ilustración 69. Diseño 3D sujeción lateral.....	87
Ilustración 70. Diseño 3D unión bomba de agua.....	87
Ilustración 71. Esquema del montaje neumático.....	88
Ilustración 72. Elementos adquiridos para el circuito.....	89
Ilustración 73. Esquema del circuito eléctrico.....	90
Ilustración 74. Esquema pilares de madera del prototipo.....	91
Ilustración 75. Montaje de la base y los pilares del prototipo.....	91
Ilustración 76. Montaje de balancín y su eje.....	92
Ilustración 77. Estructura de sujeción del pistón.....	94
Ilustración 78. Montaje pistón y barras movimiento paralelo.....	94
Ilustración 79. Esquema pieza de unión.....	95
Ilustración 80. Montaje pieza de unión con el cilindro.....	96
Ilustración 81. Conexión de válvulas con la bomba.....	97
Ilustración 82. Depósito de agua.....	97
Ilustración 83. Unión de la bomba al depósito de agua.....	98
Ilustración 84. Detalle articulación entre la varilla y el vástago de la bomba.....	99
Ilustración 85. Unión de la varilla con el balancín.....	99
Ilustración 86. Prototipo final.....	101
Ilustración 87. Modelado 3D macizo balancín.....	102
Ilustración 88. Detalle restricción estructural en Fusión 360.....	103
Ilustración 89. Aplicación de fuerzas al modelo en Fusión 360.....	104
Ilustración 90. Zonas a conservar en el modelo base en Fusión 360.....	104
Ilustración 91. Resultado de la optimización del balancín.....	105
Ilustración 92. Resultado de la eliminación de material.....	105

Ilustración 93. Resultado en factor de seguridad	106
Ilustración 94. Resultado de la tensión	106
Ilustración 95. Resultado del desplazamiento.....	107
Ilustración 96. Propuesta de mejora estética para el balancín	107
Ilustración 97. Resultado de la segunda optimización de material.....	108
Ilustración 98. Modelo optimizado final.....	108
Ilustración 99. Resultado final del coeficiente de seguridad.....	109
Ilustración 100. Resultado final de la tensión.....	109
Ilustración 101. Resultado final del desplazamiento	109

Índice de tablas

Tabla 1. Datos iniciales	35
Tabla 2. Volúmenes principales.....	35
Tabla 3. Propiedades estado A	36
Tabla 4. Propiedades estado B	37
Tabla 5. Propiedades estado C	37
Tabla 6. Propiedades estado D	38
Tabla 7. Propiedades estado E	38
Tabla 8. Propiedades estado F.....	38
Tabla 9. Medidas principales del pistón seleccionado	66
Tabla 10. Componentes de la electroválvula	67
Tabla 11. Componentes del regulador de caudal	70
Tabla 12. Propiedades filamento PLA	71
Tabla 13. Propiedades fibra Onyx	72
Tabla 14. Características resina fotopolimérica	84
Tabla 15. Elementos del circuito.....	88

