



POLITÉCNICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid
Tel.: 91 336 3060
info.industriales@upm.es

www.industriales.upm.es



Alessandro Tomás Faraboli

05 TRABAJO FIN DE GRADO

INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MAQUETA MÓVIL DEL MOTOR DE GAS ORIGINAL DE LENOIR.

SEPTIEMBRE 2024

Alessandro Tomás Faraboli

DIRECTOR DEL TRABAJO FIN DE GRADO:

José Manuel Burón Caballero



POLITÉCNICA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MAQUETA MÓVIL DEL MOTOR DE GAS DE LENOIR

Autor

ALESSANDRO TOMÁS FARABOLI

20339

Tutor

JOSÉ MANUEL BURÓN CABALLERO

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales

Septiembre de 2024, Madrid



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID



DEDICATORIA

A mis padres, que me han ayudado y han sacado lo mejor de mí durante todos estos años.

A mis amigos por animarme en los momentos más difíciles. En especial a mis amigos Curro e Ivan por acompañarme y apoyarme en todo el camino.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor José Manuel Burón Caballero por brindarme la oportunidad de realizar este proyecto.

Al *Musée des Arts et Métiers* de París por su amabilidad y generosidad al facilitarme la información necesaria para realizar este trabajo.

RESUMEN

El motor de Lenoir, diseñado en 1860 por el ingeniero belga Jean-Joseph Étienne Lenoir, representó uno de los primeros pasos hacia la evolución de los motores de combustión interna. Este motor marcó un hito en la historia de la ingeniería haciendo posible la transición de las máquinas de vapor a sistemas de propulsión más compactos y eficientes. Además, la revolución industrial, con la mecanización y la innovación en materiales y fuentes energéticas, fue fundamental para la aceptación y desarrollo de este motor. A pesar de que presentaba algunos defectos, como por ejemplo su limitada eficiencia, gracias a la máquina de Lenoir se ha conseguido desarrollar la tecnología que hoy es fundamental en la industria automotriz y de maquinaria.

El motor funcionaba en un ciclo de dos tiempos mediante una mezcla de gas de carbón y aire que se introducía en el cilindro mediante un mecanismo coordinado de apertura y cierre de válvulas correderas, accionado por el movimiento del propio cigüeñal.

Este trabajo se centra en la recreación y modelado 3D del motor con la intención de rendir el homenaje que se merece al ingeniero belga y a su invención. Este proyecto está compuesto de varias fases con la finalidad de cumplir una serie de objetivos. Entre estos destacan la adquisición de conocimientos avanzados en diseño asistido por computadora (CAD) usando el software SolidWorks y el dominio de la impresión 3D. Otras metas importantes han sido la reparación de la impresora 3D del laboratorio de motores térmicos, la cual sufría varias averías, y la creación de una maqueta precisa que reproduzca el motor a escala.

La primera fase del proyecto fue una investigación histórica para encontrar planos y patentes indispensables para el inicio del diseño, con la necesidad de contactar con instituciones como el *Musée des Arts et Métiers* de París. Una vez conseguido todos los documentos requeridos se inició con el aprendizaje por medio de manuales y videos del programa SolidWorks. Gracias a ello se descubrieron las herramientas y funciones necesarias para desarrollar el diseño de cada una de las piezas que componen la máquina. Finalmente, la realización de mediciones permitió un correcto y eficiente diseño de todas las piezas, destacando como la más compleja y difícil de hacer el cilindro. Se comprobó el correcto diseño de cada una de ellas mediante su ensamblaje en el programa.

Completado el diseño del motor, se pasó a la reparación de la impresora, un modelo Tronxy x5sa. Contaba con varios fallos como una mala calibración de la mesa térmica, la obstrucción de la boquilla que impedía una correcta extrusión del material y un notable desgaste en una de las piezas del sistema de alimentación del hilo que bloqueaba la impresión. Mediante el desarme y el arreglo de las partes averiadas se puso nuevamente en funcionamiento la impresora. Para comenzar a imprimir las piezas, se establecieron los parámetros de impresión más adecuados en el programa “slicer” Cura. Este tipo de programas prepara las piezas para que la impresora las reconozca y las fabrique. Posteriormente a la impresión de varias partes del motor, a consecuencia del cierre de la universidad en el mes de agosto, se utilizó una nueva impresora, en este caso una Anycubic Kobra 2 pro junto a su “slicer” personalizado.

En total se imprimieron 61 piezas, todas con la calidad esperada y con una escala 1:2 de las originales. Se realizó el ensamblaje del motor, logrando así alcanzar todos los objetivos marcados al inicio del proyecto

La finalización de este trabajo abre camino a otras posibles propuestas de proyecto como el diseño y fabricación del sistema eléctrico del motor o de un regulador Watt que complemente la maqueta. Otro proyecto un poco más ambicioso sería la creación de la misma maqueta pero con metal con el objetivo de crear un motor que funcione con combustible, como el diseñado por Lenoir.

En cuanto a la planificación, el trabajo entero ocupó un total de 130 días y la fase más larga fue la de diseño que fue llevada a cabo en 80 días.

Referente al presupuesto, el coste total del proyecto fue de 14.207€ incluyendo todos los costes directos, tanto humanos como materiales, y los indirectos.

Palabras clave.

Motor de Lenoir, diseño 3D, SolidWorks, Impresión 3D,

Códigos UNESCO.

- 120309 Diseño con ayuda de ordenador
- 120311 Software
- 330306 Tecnología de la combustión
- 331001 Maquinaria industrial
- 331313 Motores de combustión interna

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 Contexto histórico.....	10
1.2 Historia de Étienne Lenoir.....	11
1.3 Innovación y funcionamiento del Motor de Lenoir.....	12
1.3.1 Diferencias con la máquina de vapor.....	12
1.3.2 Funcionamiento.....	13
1.4. El ciclo de Lenoir.....	15
1.4.1 Cálculo de la eficiencia y potencia.....	16
2 OBJETIVOS.....	20
3 METODOLOGÍA.....	23
3.1 Investigación y adquisición de conocimientos.....	23
3.2 Planos y patentes.....	23
3.3 Diseño asistido por ordenador.....	25
3.2.1 Diseño de Piezas.....	29
3.2.2 Ensamblaje.....	35
3.4 Reparación de la impresora e impresión 3D.....	36
3.5 Impresión de piezas.....	40
4 RESULTADOS.....	47
4.1 Diseño del motor.....	47
4.1.1 El cilindro.....	47
4.1.2 Las entradas de aire y gas, y salida de gases de combustión.....	49
4.1.3 El pistón y las guías de cruceta.....	50
4.1.4 La biela.....	51
4.1.5 El cigüeñal.....	52
4.1.7 El volante de inercia.....	53
4.1.8 Las válvulas correderas de entrada y salida de gases.....	54
4.1.9 Las fases del motor.....	56
4.1.10 La bancada del motor.....	57
4.1.11 Ensamblaje del motor.....	58
4.2 Impresión de la maqueta.....	60
4.2.1 El cilindro.....	61
4.2.2 Entradas de aire y gas, y salida de gases de combustión.....	62
4.2.3. La biela, el pistón y las guías de cruceta.....	63
4.2.4 El cigüeñal.....	64
4.2.5 Volante de Inercia.....	65

4.2.6 Las válvulas de entrada y salida de gases.	65
4.2.7 La bancada del motor.	66
4.2.8 El motor ensamblado.....	67
5 CONCLUSIONES.....	70
6 IMPACTO DEL PROYECTO.	72
7 LÍNEAS FUTURAS.....	74
8 BIBLIOGRAFÍA.	76
9 PLANIFICACIÓN Y PRESUPUESTO.....	78
10 INDICE DE FIGURAS.	82
11 ÍNDICE TABLAS.	85
12 ABREVIATURAS, SIMBOLOS Y UNIDADES.....	87
13 GLOSARIO.	89
14 ANEXOS.	91
14.1 Planos y documentos del motor de Lenoir.	91
14.2 Dibujos del motor y de piezas a diferentes escalas.....	94
14.3 Patente US 31.722 del motor de Lenoir.	97

1 INTRODUCCIÓN.

La invención del motor de combustión interna ha sido una pieza fundamental en la evolución de la tecnología y de la industria en los últimos 150 años. En la actualidad, es habitual observar las calles repletas de automóviles, cada vez con mayor funcionalidad, complejidad y eficiencia y todo esto ha sido posible gracias a los ingenieros pioneros del siglo XIX que sentaron las bases de los actuales motores de combustión. Uno de estos pioneros fue el ingeniero belga Jean-Joseph Étienne Lenoir, quien en 1860 creó el primer motor de combustión interna práctico, abriendo las puertas a una infinidad de nuevas posibilidades y desarrollos en el campo de la ingeniería de propulsión.

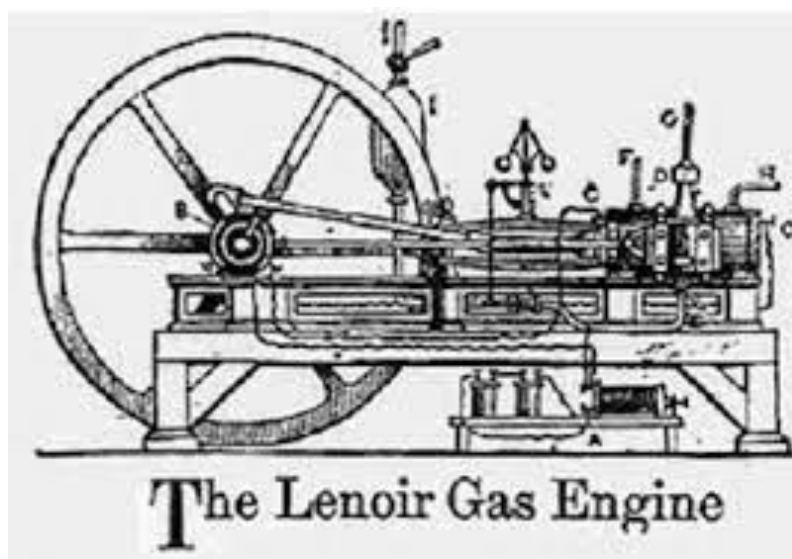


Figura 1: Ilustración de época del motor de Lenoir

El presente proyecto incluye una primera fase de recopilación de información del motor con el objetivo de diseñar la máquina de una forma precisa y conocer el contexto de la invención y el avance tecnológico que representó.

En este documento se describe el primer motor de Lenoir, su funcionamiento, las piezas y partes que lo componen.

A partir de estos datos, se diseñará una réplica funcional del motor de Lenoir con tecnologías modernas de modelado y fabricación aditiva que homenajeará a uno de los inventos más significativos del siglo XIX y demostrará las posibilidades que permite el campo del diseño y modelaje 3D.

Una vez modelada cada una de las piezas y realizado el ensamblaje de todo el conjunto con el programa CAD seleccionado, se realizará la impresión de las mismas y finalmente su ensamblaje físico y prueba del movimiento del motor.

Antes de la impresión fue necesario reparar y ajustar la impresora 3D del departamento que ha sido utilizada para la impresión de este motor.

1.1 Contexto histórico.

Para poder apreciar no solo la innovación técnica del motor de Lenoir, sino también su impacto en la economía y la sociedad de la época es necesario comprender el contexto histórico en el que se sitúa esta invención.

En la mitad del siglo XIX el mundo se situaba en el apogeo de la revolución industrial. La revolución industrial (1760-1840) que nació en Gran Bretaña, supuso una transformación radical que causó profundos cambios en los sectores tecnológicos, culturales y socioeconómicos de la época [1].

La economía pasó de depender exclusivamente de la agricultura y artesanía a otorgar un papel cada vez más importante a la industria. Nuevos materiales como el acero, nuevas fuentes energéticas como el carbón empezaron a utilizarse y fueron la base para la creación de máquinas motrices como la máquina de vapor, considerada como la pieza clave para el inicio de esta revolución. También destacan la aparición de la máquina de hilar y tejer que aumentaron la eficiencia y productividad de la industria textil.

La máquina de vapor tuvo un papel importante en este proceso sustituyendo el trabajo generado por el animal de tiro, el molino de viento o el propio hombre por el de máquinas. El transporte principalmente se realizaba mediante trenes y barcos movidos con máquinas de vapor. Como resultado hubo una mejora sustancial de la productividad y un incremento de la producción global.

En este contexto de mecanización de los medios de producción podemos comprender el impacto positivo y relevante que tuvo la invención del motor de Lenoir.

La revolución industrial también se manifestó en forma de un impresionante aumento de conocimientos en ramas científicas, técnicas y sanitarias. Estos avances llevaron a una mejoría de la calidad de vida y a un aumento de la población europea por la elevada natalidad y el descenso de la mortalidad.

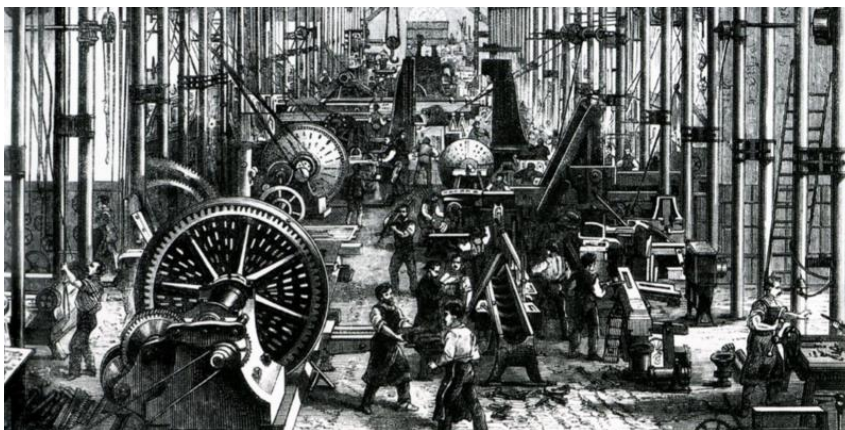


Figura 2: Fábrica del siglo XIX

1.2 Historia de Étienne Lenoir.

Jean Joseph Étienne Lenoir fue un ingeniero belga nacido el 12 de enero de 1822 en Mussy-la-Ville, Luxemburgo belga (actualmente parte de Bélgica) y falleció el 4 de agosto de 1900 en la localidad de La Varenne-Saint-Hilaire, Francia [2].



Figura 3: Étienne Lenoir

En 1838 Lenoir emigró a París para conseguir éxito y fortuna. En esa época no tenía ni estudios ni dinero por lo que empezó a ejercer todo tipo de oficios, como camarero, cocinero, etc.

Desde temprana edad mostró un gran interés por la mecánica y la ingeniería y esta pasión por la tecnología fue la que le llevó a explorar diferentes campos.

En 1847, tras estudiar por su cuenta y formarse, comenzó a trabajar y desarrollar diferentes dispositivos mecánicos y motores.

En el año 1860 Lenoir presentó su invención más significativa, protagonista de este trabajo, el motor de gas de combustión. Este motor está construido sobre los cimientos de la máquina de vapor.

La gran novedad era la explosión de la mezcla en el interior del cilindro, hecho que era totalmente novedoso y revolucionario.

Lenoir diseñó y construyó un primer prototipo del motor, demostrando su correcto funcionamiento y que podía ser un producto viable para su generación en serie.

Sin embargo, el motor resultante era ineficiente y consumía mucho gas de iluminación que provenía del carbón; para generar un caballo de fuerza se necesitaba muchísimo más carbón para generar el gas que el consumido en una máquina de vapor. La eficiencia del motor se situaba en menos del 5% y todo hacía indicar que su invento estaba destinado al fracaso, pero no fue así. Las principales ventajas del nuevo motor fueron las siguientes: era compacto, arrancaba en segundos, ocupaba poco espacio, no necesitaba de trabajadores alimentando la caldera de vapor y era relativamente silencioso. Por estos motivos los primeros motores se vendieron en París y después su venta se fue extendiendo por toda Francia e Inglaterra.

Su éxito duró pocos años. El ingeniero alemán Nicolaus Otto, tras probar una réplica del motor de Lenoir se dio cuenta que el rendimiento del motor mejoraría de forma sustancial al comprimir la carga y en 1867, junto con Eugen Langen, presentaron el motor de explosión a cuatro tiempos, mucho más eficiente, en la Exposición Universal de París.

1.3 Innovación y funcionamiento del Motor de Lenoir.

1.3.1 Diferencias con la máquina de vapor.

La construcción y la disposición de una gran cantidad de partes del motor de Lenoir están basadas en la pesada máquina de vapor. Las principales diferencias que podemos encontrar entre uno y otra son:

- **Combustible y fuente de energía:** Mientras la máquina de vapor utiliza, como bien su nombre indica, vapor de agua proveniente de una caldera, el motor de Lenoir se acciona mediante una mezcla de aire con gas carbón. Esta mezcla se enciende mediante una chispa eléctrica, mientras que el vapor generado en la caldera se forma gracias a la combustión de carbón.
- **Tamaño:** Una de las principales diferencias y características que convertían al motor de Lenoir en una máquina más que interesante en esa época era la diferencia de tamaño que tenía frente a la máquina de vapor. El motor creado por el inventor belga era de tamaño reducido y compacto evitando las grandes pérdidas de calor que sufría la máquina de vapor.
- **Operación:** El atributo más innovador del motor propulsado con gas era que operaba mediante combustión interna dentro del cilindro, provocando una explosión que era la causante del movimiento del pistón; hecho muy dispar al movimiento provocado por la expansión del vapor al que estaban acostumbrados en la época. [3]

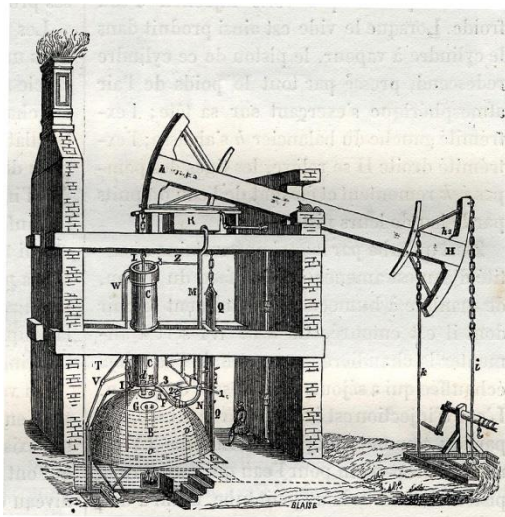


Figura 4: Diseño de máquina de vapor de la época

1.3.2 Funcionamiento.

Se trata de un motor de combustión de dos tiempos, lo que significa que los procesos de admisión, combustión y escape se completan con dos carreras del pistón.

Lenoir gas engine - US Patent 31,722 Fig. 1

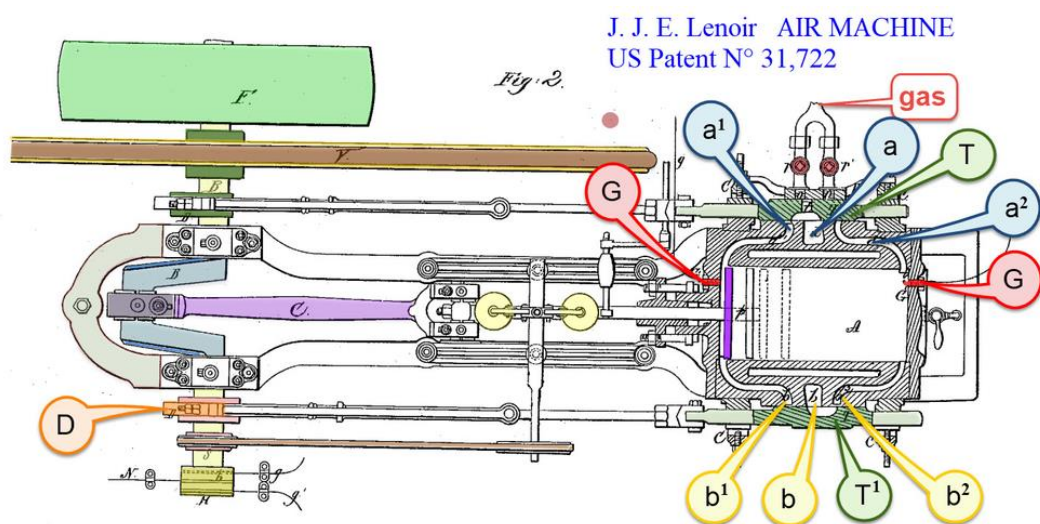
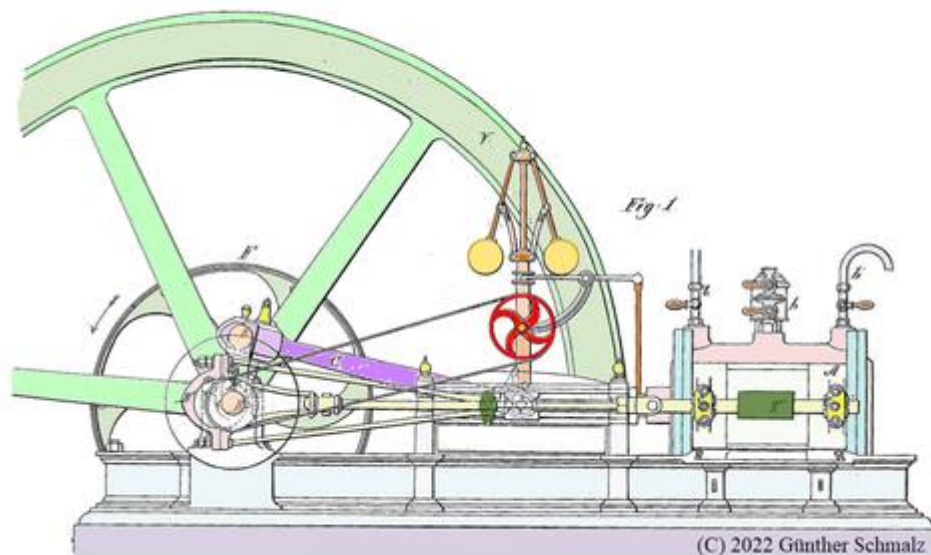


Figura 5: Patente US 31.722 Motor Lenoir

Como se puede observar en estas dos imágenes del *Gabinet Guenther Schmalz* de patentes de Mónaco [4], el cilindro dispone de dos válvulas que se deslizan, denominadas “T” y “T1”. Estas válvulas, que se encuentran desfasadas entre sí, permiten el paso de los gases en función de la posición en que se encuentran. Cuando la válvula T conecte el conducto “a” con el “a1” o “a2”, se permitirá el paso de la mezcla de aire y gas a cada lado del pistón. Mientras que si la válvula

“T1” permite la conexión del conducto b con el “b1” o “b2” se comunicará el cilindro con el exterior dejando pasar los productos de la combustión.

Como se puede observar, son de gran importancia la posición y el desfase de las válvulas para el correcto flujo de gases de entrada y de salida.

El movimiento de las dos válvulas correderas viene dado por dos excentricidades, “D” y “D1” que están conectadas al cigüeñal. Al revolucionar éste, las excentricidades producen un movimiento circular y al estar conectadas mediante un eje a las válvulas, este movimiento las empuja linealmente hacia adelante y atrás.

El sistema que transmite el movimiento del pistón con el cigüeñal está formado por diferentes elementos. En primer lugar, encontramos la biela “C”. Por un lado, la cabeza de la biela está conectada al cigüeñal, mientras que el pie de la biela se ramifica en dos barras paralelas. Estas barras paralelas están conectadas al eje del pistón que discurre en un carril que permite el movimiento lineal del pistón.

En cada cubierta del cilindro encontramos dos encendedores “G”. Este tipo de bujías estaba conectada con una batería o con cualquier elemento generador de electricidad mediante una bobina de Ruhmkorff. La bobina de inducción de Ruhmkorff genera un pulso de alta tensión utilizando una fuente de baja tensión. El pulso de tensión provoca la chispa en el encendedor y la combustión de la mezcla.

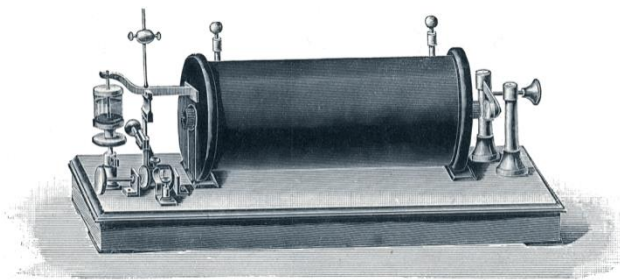


Figura 6: Bobina de Ruhmkorff

Al iniciar el motor, en primer lugar, ocurre un pequeño desplazamiento del pistón con el objetivo de producir un efecto de vacío con su paso. Esto facilita la entrada de la mezcla de gas y aire al alinearse la válvula con los conductos “a” y “a1”.

Una vez cerrada la corredera “T”, la bujía “G” produce un chispazo provocando el encendido de los gases. Como fruto de la combustión se produce una alta presión que causa el desplazamiento del pistón hacia el lado opuesto. A su vez, la válvula “T1” permite la conexión de “b” con “b1” permitiendo a los productos de la combustión escapar del cilindro hacia el exterior. Una vez completado esto y con el pistón situado al otro extremo, se repite el proceso, pero con la apertura y cierre de las válvulas “a2” y “b2”.

El volante de inercia completa el motor asistiendo en todo momento el movimiento del pistón.
[4]

1.4. El ciclo de Lenoir.

El ciclo del motor de Lenoir es un ciclo termodinámico que describe el funcionamiento de un motor de combustión interna alternativo simplificado que no tiene compresión previa. La figura 7 de la izquierda muestra la variación de la presión y del volumen específico a lo largo de todo el ciclo, mientras que la figura de la derecha muestra la evolución de la temperatura y la entropía.

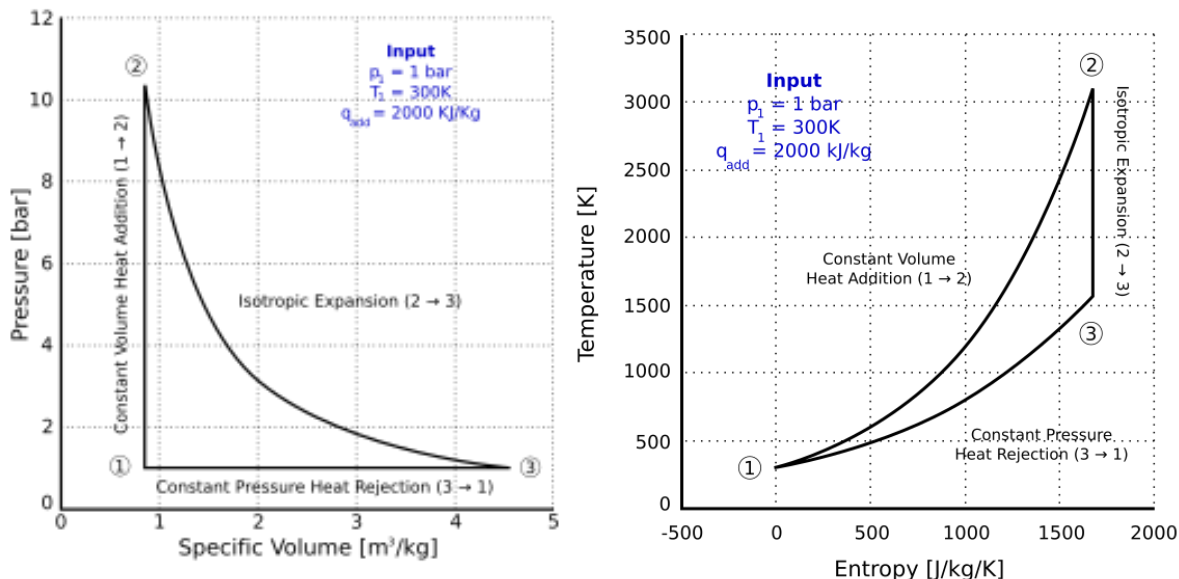


Figura 7: Ciclo de Lenoir

Se pueden diferenciar tres fases:

- Fase 1-2. Aportación de calor a volumen constante.
- Fase 2-3. Expansión adiabática.
- Fase 3-1. Extracción de calor a presión constante.

Fase 1-2. Aportación de calor a volumen constante.

En esta etapa, al producirse calentamiento a volumen constante, no se produce trabajo. De la primera ley de la termodinámica se obtiene:

$$Q = mC_v(T_2 - T_1)$$

Siendo:

Q : el calor aportado al sistema (Julios);

m : masa del sistema (kilogramos);

C_v : capacidad calorífica específica a volumen constante, que indica la cantidad de energía necesaria para aumentar en un grado Kelvin la temperatura de un Kg de la mezcla sin variar la temperatura ($\frac{J}{KgK}$);

$(T_2 - T_1)$ = diferencia de temperaturas entre el punto 2 y el punto 1 (grados kelvin o grados celcius).

Fase 2-3. Expansión adiabática.

Esta etapa conlleva una expansión sin transferencia de calor que se realiza de forma isentrópica en la que el fluido recupera su presión inicial. Al ser un proceso isentrópico, se puede relacionar la temperatura y presión del punto 2 con las del punto 3 mediante:

$$\frac{T_2}{T_3} = \left(\frac{P_2}{P_3}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{V_3}{V_2}\right)^{\gamma-1}$$

γ = Coeficiente adiabático que es la relación entre la capacidad calorífica a presión constante C_p y la capacidad calorífica a volumen constante C_v .

Fase 3-1. Extracción de calor a presión constante.

En esta etapa se produce el enfriamiento del sistema a presión constante. Se puede medir el calor extraído realizando el balance de energía con la siguiente fórmula:

$$Q = mC_p(T_1 - T_3)$$

Q = el calor extraído del sistema (Julios);

m = masa del sistema (kilogramos);

C_p = capacidad calorífica específica a presión constante, que nos indica la cantidad de energía necesaria para aumentar en un grado Kelvin la temperatura de un Kg de la mezcla sin variar la presión ($\frac{J}{KgK}$);

$(T_1 - T_3)$ = diferencia de temperaturas entre el punto 2 y el punto 1 (grados kelvin o grados celcius);

1.4.1 Cálculo de la eficiencia y potencia.

Una vez obtenidos todos los datos del calor se puede calcular la eficiencia de la máquina usando la fórmula:

$$\eta = \frac{Q_{aportado} - |Q_{extraido}|}{Q_{aportado}} = \frac{Q_{12} - |Q_{31}|}{Q_{31}} = \frac{mC_v(T_2 - T_1) - mC_p(T_1 - T_3)}{mC_v(T_2 - T_1)} = 1 - \gamma \frac{(T_1 - T_3)}{(T_2 - T_1)}$$

Supuestos:

- Se considera que la mezcla se comporta como el aire. El aire al ser un gas diatómico tiene las siguientes capacidades caloríficas:

$$C_v = \frac{5}{2} * R = \frac{5}{2} * 8,314 = 20,8 J/mol.K$$

$$C_p = \frac{7}{2} * R = \frac{7}{2} * 8,314 = 29,1 J/mol.k$$

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{7}{5} = 1,4$$

$$\text{Peso molecular del aire} = 28,96 \text{ g/mol}$$

- La temperatura de ambiente es $T_1 = 300^\circ\text{K}$.
- Que la mezcla al explosionar genera el siguiente calor específico $q_{1-2} = 2.000 \text{ kJ/kg}$.

Fase 1-2 cálculo de T_2 : Se considera 1 gr de masa

$$mq_{12} = mC_v(T_2 - T_1)$$

$$2000 \text{ J/g} = (1 \text{ g} / 28,96 \text{ g/mol}) * 20,8 \text{ J/molK} (T_2 - 300)$$

$$T_2 = 3.085^\circ\text{K}$$

Fase 2-3 cálculo de T_3 :

Mediante la fórmula de los gases ideales podemos relacionar el punto 2 con el 3.

$$\begin{aligned} PV &= nRT \\ \frac{PV}{T} &= nR = \text{cte} \\ \frac{P_2V_2}{T_2} &= \frac{P_3V_3}{T_3} \\ T_3 &= T_2 \frac{P_3V_3}{P_2V_2} \end{aligned}$$

Una vez llegada a esta ecuación se debe relacionar $\frac{P_3}{P_2}$ y $\frac{V_3}{V_2}$ con las temperaturas.

De igual forma, se puede relacionar el punto 3 con el 1 con la misma ecuación. Se observa que el punto 1 y el 3 tienen el mismo volumen. Por tanto:

$$\begin{aligned} \frac{V}{T} &= \frac{nR}{P} = \text{cte} \\ \frac{V_3}{V_1} &= \frac{V_2}{V_1} = \frac{T_3}{T_1} \end{aligned}$$

Al ser la fase 2-3 adiabática se cumple la relación:

$$\begin{aligned} \frac{T_2}{T_3} &= \left(\frac{P_2}{P_3}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \\ \frac{P_3}{P_2} &= \left(\frac{T_2}{T_3}\right)^{\gamma/(1-\gamma)} \end{aligned}$$

Sustituimos las dos relaciones en la ecuación inicial:

$$\begin{aligned} T_3 &= T_2 \left(\frac{T_2}{T_3}\right)^{\gamma/(1-\gamma)} \frac{T_3}{T_1} \\ T_3 &= \frac{T_2^{1/\gamma}}{T_1^{1-\gamma/\gamma}} = \frac{3084^{1/1,4}}{300^{1-1,4/1,4}} = 1.585\text{K} \end{aligned}$$

Calculada la temperatura 3, la extracción de calor a presión constante $Q_{extraído}$ por gramo sería:

$$Q_{extraído} = nC_p(T_3 - T_1) = (1g / 28,96 g/mol) * 29,1 \frac{J}{molK} (1585 - 300) = -1.291J$$

El rendimiento quedaría:

$$\eta = \frac{Q_{aportado} - |Q_{extraído}|}{Q_{aportado}} = 1 - \frac{|Q_{extraído}|}{Q_{aportado}} = 1 - \frac{1291}{2000} = 0,354$$

Aunque la eficiencia térmica teórica está próxima al 35%, la realidad era que el rendimiento no superaba el 4%. Esta reducción tan importante era debida a que la combustión no estaba completamente controlada y no era del todo eficiente, una parte importante de la energía generada se disipaba en calor, había pérdidas importantes de potencia por fricción interna debido a que el diseño del motor era muy simple.

El motor de Lenoir trabajaba entre 100 y 150 rpm. Para proporcionar un cálculo grosso modo de la potencia máxima que podría suministrar el motor diseñado, se hacen las siguientes suposiciones:

Diámetro del pistón (según diseño) $D = 18$ cm.

Carrera del pistón (según diseño) $S = 20$ cm.

*Cilindrada del motor $V_d = \text{Área Pistón} * S = 5,10$ litros.*

*Volumen de cámara de combustible por cavidad $V_c = \text{Área Pistón} * 7$ cm = 1,78 litros.*

Número de cavidades en el cilindro $z = 2$.

Densidad de la mezcla de combustible $\rho = 1,2$ g/l.

Calor específico mezcla de combustible $c = 2.000$ J/g.

Rendimiento máximo del motor $\eta = 4\%$ a 120 rpm.

$n = 120$ rpm = 2 rps.

El rendimiento es igual al trabajo generado partido por la energía aportada, dividiendo ambos por el tiempo se obtiene la relación en potencia y en flujo de calor.

$$\eta = \frac{W}{Q_{aportado}} = N/\dot{Q}$$

$$\text{Potencia } N = \dot{Q} * \eta = c * \dot{m} * \eta = c * z * V_c * \rho * n * \eta =$$

$$2000 \text{ J/g} * 2 * 1,38 \text{ l} * 1,2 \text{ g/l} * 2 \text{ rps} * 4\% = 608 \text{ W} = 0,83 \text{ CV.}$$

$$\text{El flujo de masa de la mezcla se calcula como } \dot{m} = z * V_c * \rho * n$$

A partir de la potencia podemos calcular el par:

$$M = \frac{N}{2\pi n} = \frac{608}{2 * \pi * 2} = 48 \text{ Nm}$$

2 OBJETIVOS.

Los objetivos que han impulsado ese proyecto son varios y dos de ellos destacan sobre los demás: el rendir el homenaje que se merece a la invención de Lenoir y adquirir conocimientos sobre el maravilloso y extenso mundo del diseño y de la impresión en 3D.

Se busca reconocer la importancia histórica del motor y destacar la ingeniosidad y visión de Lenoir al concebir un motor que ayudó a sentar las bases para futuros desarrollos como el famoso motor de cuatro tiempos de Otto.

Con el diseño del motor se cumple el objetivo de dominar el uso de SolidWorks. Con esto se busca desarrollar habilidades avanzadas en el uso del programa para diseñar la máquina con precisión y detalle, obteniendo los conocimientos suficientes y necesarios que pueden ser útiles en un futuro en el ámbito profesional. Esto incluye asegurar que cada pieza cumpla con las especificaciones técnicas y funcionales necesarias, considerando las limitaciones y características que la impresión 3D permite.

A este propósito, cabe destacar la importancia hoy en día de dominar la fabricación aditiva. En los últimos años, esta tecnología, que comenzó como una herramienta costosa y con muchas limitaciones, ha evolucionado significativamente convirtiéndose en una habilidad crucial para ingenieros y profesionales de diversas disciplinas.

Este tipo de fabricación utiliza materiales baratos y accesibles para todo el mundo; es más eficiente, reduce los desperdicios y evita la necesidad de avanzados medios disminuyendo los costes de producción.

Adicionalmente, hay otros dos objetivos que es relevante destacar. Por una parte, la reparación de la impresora 3D del taller de motores volumétricos que no permitía la correcta impresión de cualquier pieza debido a la falta de extrusión o a fallos en el sistema de alimentación del material. En este proyecto se detallará todo el proceso llevado a cabo para su reparación y ajuste.

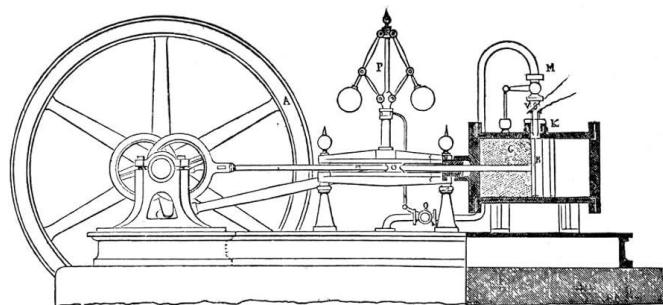


Figura 8: Dibujo del motor de Lenoir

Por otra parte, la puesta en práctica de los conocimientos teóricos adquiridos en los cuatro cursos del grado que permiten resolver complejos problemas y afrontar nuevos desafíos como lo haría un ingeniero en ejercicio.

Los objetivos que se han perseguido en este trabajo se pueden detallar en la siguiente lista:

- Adquirir los conocimientos sobre el funcionamiento del motor.
- Investigación y obtención de planos y medidas para la realización del diseño del motor.
- Obtención de los conocimientos necesarios sobre SolidWorks para la realización de cada pieza y el ensamblaje del motor entero incluyendo simulaciones.
- Diseño en SolidWorks del motor de Lenoir con la intención de obtener un modelo lo más cercano a la realidad.
- Realización de todos los planos de cada pieza de la máquina para obtener las medidas exactas para facilitar su fabricación.
- Obtención de los conocimientos necesarios para el arreglo de la impresora y la configuración, utilización de impresoras 3D.
- Impresión en 3D y ensamblaje del motor completo.

3 METODOLOGÍA.

3.1 Investigación y adquisición de conocimientos.

El proceso de investigación y adquisición de conocimientos de este proyecto ha representado un porcentaje muy representativo del total de horas invertidas en el mismo. Incluye actividades, tales como la búsqueda de planos y documentos sobre el motor de Lenoir necesarios para el diseño del motor, la lectura de manuales y la realización de objetos de pruebas en 3D para obtener los conocimientos suficientes sobre SolidWorks; la lectura de manuales y documentos para poder utilizar, reparar y ajustar la impresora 3D del taller.

Hay que recalcar que el orden en el que se van a presentar los diferentes puntos de este proceso es crucial tanto para la realización del proyecto como para facilitar la comprensión del mismo.

3.2 Planos y patentes.

Al iniciar la realización del proyecto la principal preocupación ha sido la búsqueda de información para iniciar lo antes posible el diseño del motor.

Al inicio de la investigación llamó la atención la escasa información que había sobre este motor resultando muy difícil la obtención de cualquier tipo de plano o patente. Tras una larga búsqueda se consiguió encontrar en google patents la patente número 335.462 del 2 de febrero de 1886 que describía ciertas mejoras en su motor y la patente 345,596 con fecha 13 de Julio de 1886. Esta última patente incluye imágenes y planos del motor ensamblado en un automóvil de tres ruedas de la época junto a un esquema de su montaje, se muestra en la figura 9.

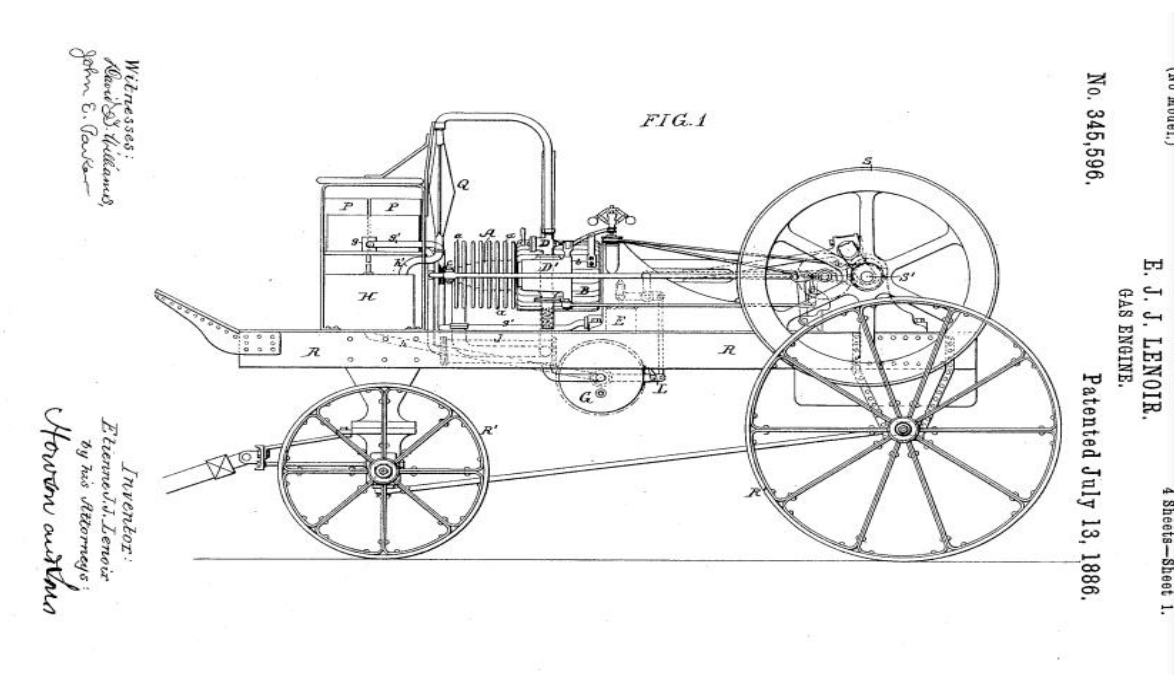


Figura 9: Dibujo automóvil con motor de Lenoir

La primera patente del motor se registró en Francia, el Reino Unido y España en 1860 y en Estados Unidos en 1861. Finalmente se ha encontrado esta última patente US 31.722 en Monaco Patents [4] y se ha adjuntado en el Anexo 3.

Se pudo comprobar que en el museo de París *Musée arts et metiers* [5] se encontraba una réplica del motor real. Se contactó con el museo y se solicitó cualquier tipo de información útil para el trabajo. En poco tiempo se obtuvo respuesta del museo que adjuntó varios planos y documentos que se encuentran en el Anexo 1. Entre ellos un esquema del motor que apareció en el boletín N.106 de la *Societe d'Encouragement* que ha servido de referencia para el diseño del motor. Se quiere expresar el más profundo agradecimiento al *Musée des Arts et Métiers* por su colaboración.

El esquema del motor del museo, se muestra en la figura 11, presenta varias diferencias con el de la patente; el pistón transcurre por una guía central con una cruceta y la entrada del aire desde el exterior se hace fuera del cilindro.

Como no existía un plano con medidas del motor, se ha asignado un diámetro al cilindro de 18 cm; a partir de esta medida se han obtenido las medidas del resto de las piezas que componen el motor con dos objetivos: uno que encajen todas las medidas de las piezas para un correcto funcionamiento de los mecanismos y, por otra parte, que se asemeje lo máximo posible al dibujo publicado en el boletín de la sociedad.

Posteriormente se han comprobado los mecanismos y se ha realizado una corrección o ajuste más preciso de las medidas gracias al ensamblaje de las partes del motor.

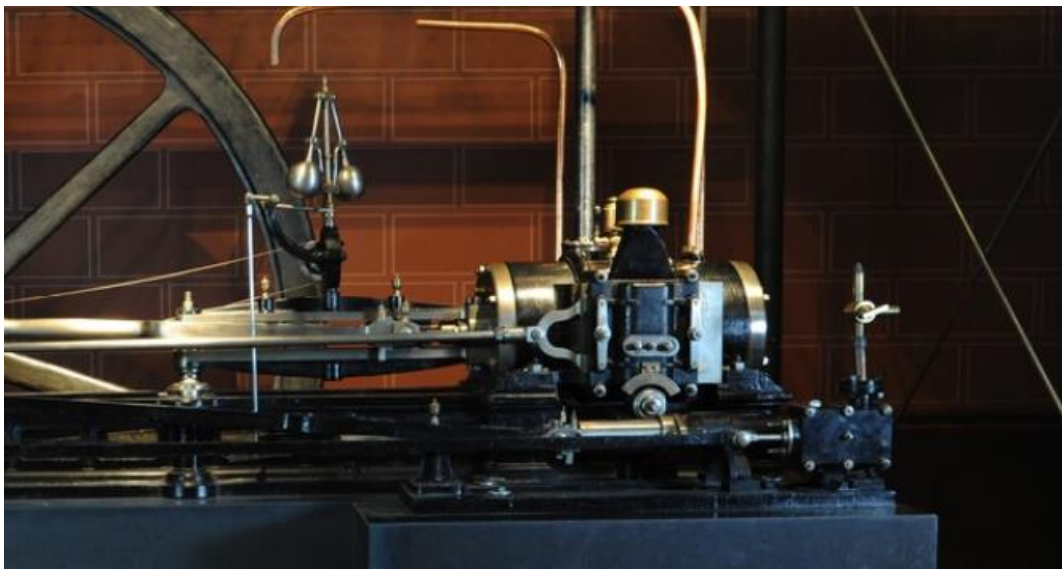


Figura 10: Motor de Lenoir en el "Musée des Arts et Métiers" de Paris

Toda esta documentación fue suficiente para comenzar a comprender el funcionamiento del motor y empezar a identificar todas las piezas de éste. Además, se utilizaron dos videos muy

ilustrativos. El primero mostraba una simulación en 3D del motor que explicaba de forma detallada y visual el principio de funcionamiento del motor. [6]

El segundo vídeo mostraba una maqueta simplificada creada por un particular. Esto ayudó a observar su funcionamiento en un contexto más práctico y tangible.[7]

Hay que recalcar que estos dos vídeos han sido fundamentales en el diseño en SolidWorks de cada una de las piezas y del ensamblaje del motor.

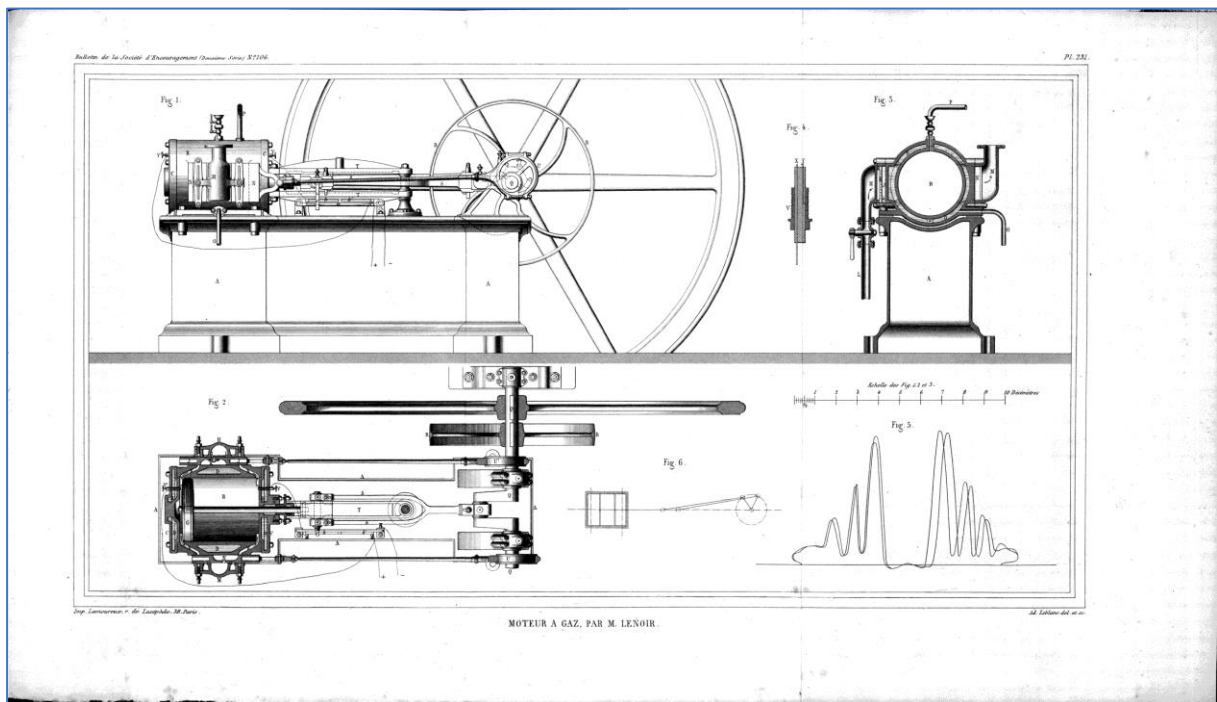


Figura 11: Esquema del motor de Lenoir.

3.3 Diseño asistido por ordenador.

El programa de diseño asistido por ordenador (CAD) utilizado ha sido SolidWorks versión 2023.



Figura 12: Logo de SolidWorks

una herramienta indispensable en muchas empresas en las cuales el diseño industrial es esencial.

SolidWorks es uno de los programas más famosos y completos que existen en el mundo del diseño y de la ingeniería. Está basado en el entorno gráfico de Microsoft Windows. Fue desarrollado en 1995 por Dassault Systèmes y desde entonces se ha ido actualizando y modernizando, dando lugar a un mundo de posibilidades que no ve límites, convirtiéndose en

Una de las primeras actividades del proyecto ha sido adquirir conocimiento y destreza para el dominio del programa SolidWorks.

Se partía de una pequeña base proveniente de la asignatura de dibujo industrial, impartida el primer año de carrera, donde se utilizó el programa SolidEdge.

Sin embargo, se necesitaba muchos más conocimientos para poder dominar y diseñar el susodicho motor.

Inicialmente se ha utilizado el manual de introducción al programa escrito en español que se encuentra en el servidor de Solidworks [8], continuando posteriormente con “El gran libro de SolidWorks” [9] mucho más extenso y completo que el anterior. Han sido de gran ayuda los ejercicios propuestos en cada uno de los capítulos de este libro.

Útiles han sido también diversos videos tutoriales en YouTube, [10] los cuáles ilustraban de una forma muy práctica y sencilla los primeros pasos para familiarizarse con la interfaz y la infinidad de opciones que contiene.

A continuación, se describe resumidamente como se han utilizado las herramientas que presenta el programa.

SolidWorks dispone de tres tipos de objetos básicos: Pieza, Ensamblaje y Dibujo.

Las piezas, como su nombre indica, contienen el diseño en 3D de cada uno de los elementos que componen el motor.

El módulo de ensamblaje agrupa las piezas y asigna relaciones geométricas de posición entre ellas para definir tridimensionalmente el conjunto.

El módulo dibujo permite obtener planos de las piezas y del ensamblaje desde diferentes vistas.

Los objetos se encuentran relacionados y vinculados entre ellos de tal modo que la modificación de una pieza, la cambia en el ensamblaje y en el dibujo que la contiene. Cada objeto se mantiene en un fichero diferente y todos los ficheros se han situado en una misma carpeta Windows para facilitar estas modificaciones cruzadas.

Esta facilidad de asociación es muy útil cuando es necesario hacer cambios en una pieza después de realizar el ensamblaje; automáticamente se comprueba si ha quedado correctamente tras efectuar las modificaciones.

En la figura 13 se puede observar un ejemplo de los tres objetos que contienen una misma pieza.

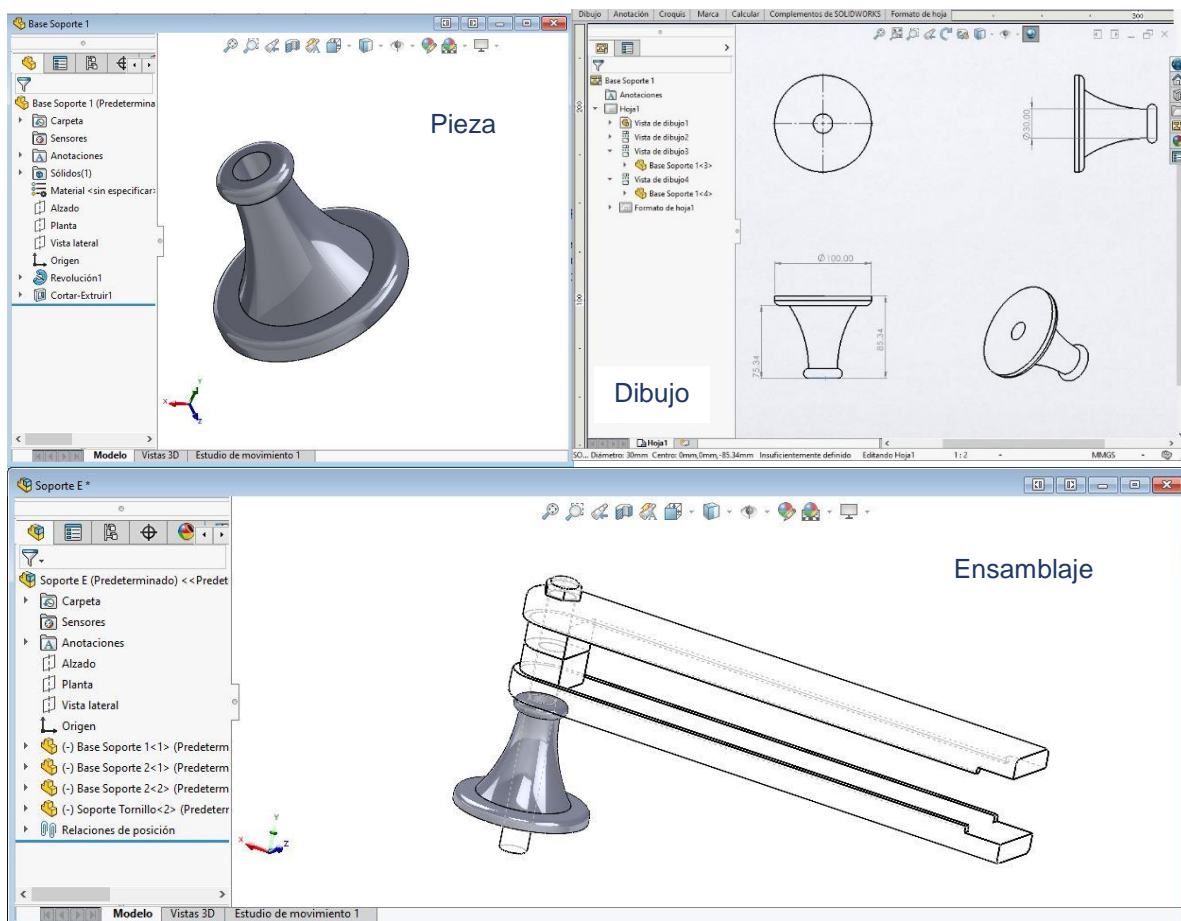


Figura 13: Ejemplo de Pieza, Ensamblaje y Dibujo

El entorno gráfico de Solidworks está dividido en tres zonas: la *Barra de Menús* y *Herramientas*, el *Gestor de Diseño* y la *Zona de Gráficos*.

La *Barra de Menús* es un entorno Windows con herramientas desplegables que muestra las operaciones que se pueden hacer en cada uno de los módulos. En la *Barra de Herramientas* se pueden anclar las operaciones más utilizadas.

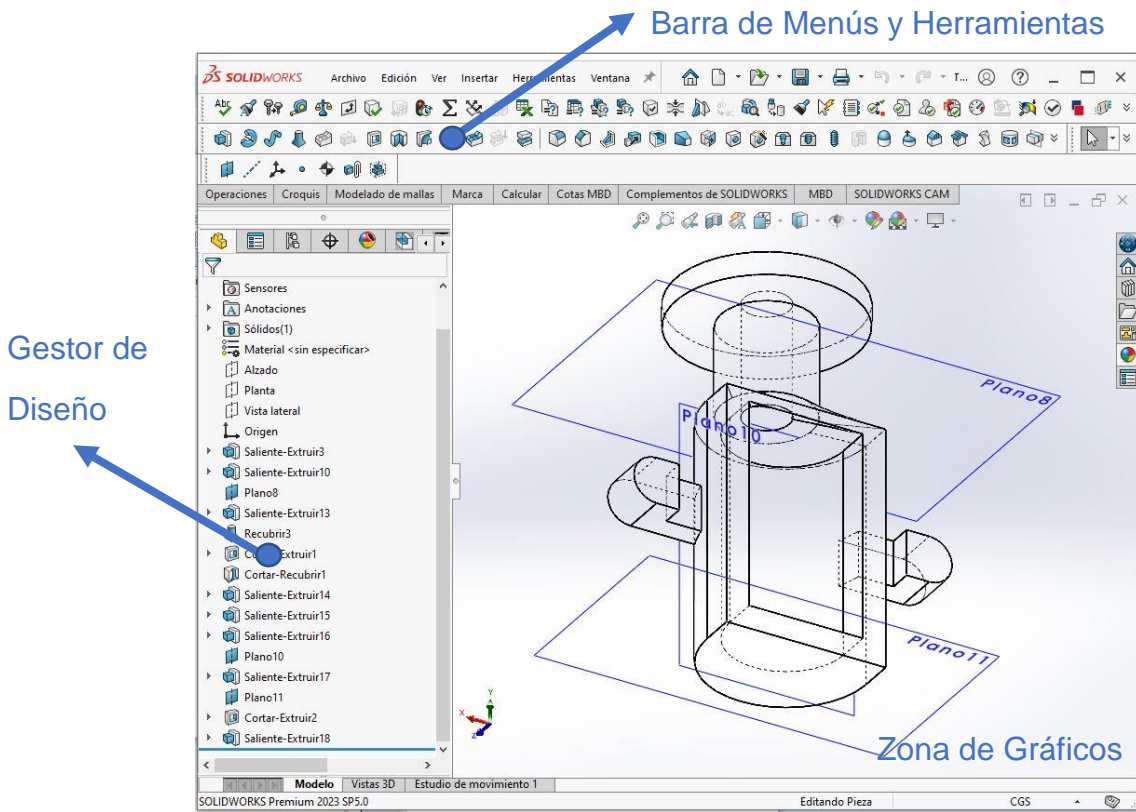


Figura 14: Entorno gráfico de SolidWorks

El gestor de diseño contiene el histórico de las operaciones realizadas en un objeto según la secuencia temporal de utilización en la creación del objeto. En la figura 14 se muestra el historial de operaciones del diseño de la salida de gases de combustión. Las operaciones más recientes son las últimas del listado.

El gestor de diseño permite cambiar el orden de las operaciones, suprimir y desactivar operaciones y visualizar errores.

Esta facilidad se ha utilizado frecuentemente para modificar una operación sin tener que rehacer el diseño de toda la pieza. La operación *Reconstruir*, como su nombre indica, rehace el objeto tras la modificación. En algunos casos ha sido necesario eliminar algunas operaciones más recientes en una rama para modificar el objeto porque no era factible su reconstrucción.

Cuando se selecciona una operación, se muestra un menú específico para esa operación, denominado *PropertyManager*, que solicita las medidas y características de la operación y define por completo la operación.

En la figura 15 se indica el *PropertyManager* de una operación de extrusión. La extrusión crea la tercera dimensión (altura) de un croquis.

Se puede apreciar desde la parte superior a la inferior: los botones de validación, cancelación de la operación y vista previa del resultado. Desde donde se hace la extrusión hasta donde se realiza (con una profundidad específica, por toda la pieza, hasta una superficie, etc...), si se realiza en vertical o con un ángulo de salida diferente, en una dirección o en dos direcciones, si se fusiona el resultado con el volumen anterior, etc...

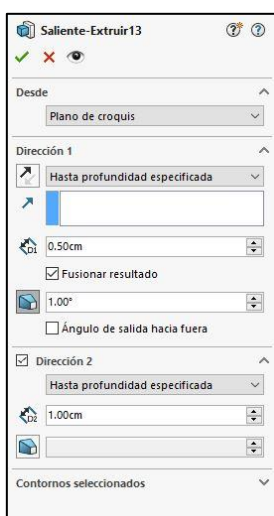


Figura 15: PropertyManager de la operación de extrusión

3.2.1 Diseño de Piezas.

Las piezas se construyen partiendo de un dibujo bidimensional (croquis) sobre un plano de trabajo. Una vez construido el dibujo se le añade una tercera dimensión sobre el plano de referencia mediante una operación tridimensional. Por ejemplo, se puede expandir en vertical sobre el plano (extrusión) o crear el objeto haciendo una revolución del croquis sobre un eje de referencia.

La secuencia es la siguiente:

1. **Selección del plano de trabajo.** Hay tres planos definidos inicialmente: *Alzado*, *Planta* y *Vista lateral*, pero se pueden construir otros planos paralelos, perpendiculares, que pasen por un punto y una arista, o utilizar el plano que forma la cara resultante de una operación anterior tridimensional.
2. **Dibujo del croquis** sobre el plano de trabajo en 2D: se realiza el croquis sobre el plano, acotando y estableciendo relaciones geométricas entre los diferentes elementos del croquis. El programa ayuda a establecer estas relaciones geométricas, indicando por ejemplo si la línea en curso es paralela o perpendicular a otra dada, marca centros geométricos de circunferencias, rectángulos, etc...
3. **Realización de operaciones tridimensionales:** mediante operaciones de extrusión o de revolución se dota de una tercera dimensión al objeto o bien se realizan operaciones directamente sobre objetos en 3D, como puede ser redondeos, chaflanes, taladros, etc...

Solidworks dispone de infinidad de herramientas de visualización, de dibujo de croquis, de operaciones en 3D, de herramientas de acotación y medida, etc... No es el objetivo de este documento hacer un manual sobre el programa, pero sí se describen brevemente aquellas herramientas y operaciones más utilizadas en el diseño del motor.

La tabla 1 muestra las operaciones para realizar el croquis. Antes de realizar el croquis es necesario elegir el plano de trabajo o bien crearlo.











OPERACIÓN	DESCRIPCIÓN
 Línea	Dibuja una línea
 Rectángulo	Permite dibujar un rectángulo fijando dos puntos de las esquinas de la diagonal.
 Círculo	Construye un círculo a partir de su centro y radio.
 Arco tangente	Crea una tangente a una figura ya creada, se fija el punto inicial y final o bien el radio del arco.
 Polígono	Permite definir un polígono indicando el diámetro de la circunferencia que lo inscribe y el número de lados.
 Línea constructiva	Línea empleada para crear ejes de simetría 2D o bien crear objetos 3D mediante revolución sobre el eje definido por la línea.
 Redondeo de croquis	Recorta esquinas de una intersección e introduce un arco tangente.
 Recortar entidades	Recorta los trazos de varias figuras que se entrecruzan. Se utiliza para obtener una curva cerrada o abierta de un croquis que posteriormente se extruye o corta en 3D
 Texto	Dibuja un texto sobre un plano que puede ser utilizado para extruir o recortar la superficie
 Cota Inteligente	Una vez pulsado, solicita la acotación correspondiente al crear o modificar una entidad de croquis.

Tabla 1: Operaciones de Croquis

Posteriormente se crea el objeto tridimensional y se modifica utilizando las operaciones 3D. En la tabla 2 se muestran las más utilizadas en este trabajo.














OPERACIÓN	DESCRIPCIÓN
 Extrusión	Construye la tercera dimensión (altura) sobre una área cerrada o abierta determinada en un croquis. Se puede dar altura con un ángulo de salida, identificando la profundidad de la extrusión y el sentido.
 Extrusión corte	Similar al anterior pero en sentido inverso, elimina de una pieza existente el volumen extruido.
 Redondeo	Redondea una arista, identificando el radio de curvatura.
 Revolución	Sobre una línea constructiva que actúa como eje, crea un objeto 3D a partir de la revolución del área identificada en un croquis.
 Revolución Corte	Como la anterior pero elimina el volumen de revolución de una pieza existente.
 Recubrir	Crea un sólido recubriendo varios perfiles de croquis situados en planos paralelos.
 Corte Recubierto	Inversa a la anterior, elimina el volumen de una pieza existente.
 Taladro	Realiza un taladro de forma automática determinando diámetro, altura, conicidad.
 Cortar con superficie	Permite cortar un volumen con un plano o superficie. Se mantiene uno de los dos lados del volumen.
 Barrido	A partir de un perfil de croquis crea un volumen barriendo un camino o trayecto previamente creado.
 Corte Barrido	Inversa a la anterior, elimina el volumen de una pieza existente.
 Plano	Crea un plano paralelo o perpendicular, etc... Los planos pueden ser utilizados para croquizar, para cortar un volumen, para crear el plano de referencia para un ángulo de salida, etc...
 Reconstruir	Reconstruye las operaciones tras una modificación.

Tabla 2: Operaciones tridimensionales

A continuación, se muestran algunos ejemplos.

Para el diseño cilindro se han realizado 21 croquis y 21 operaciones tridimensionales. En la figura 16A, se muestra el croquis de una **extrusión**. En el croquis, compuesto inicialmente por una circunferencia y un rectángulo, se han eliminado grafos con **recortar entidades** para definir un trazo único y cerrado. Posteriormente el contorno se ha extruido en los dos sentidos hasta rellenar la parte central del cilindro.

En la figura 16B, se muestra el croquis utilizado para hacer uno de los conductos internos del cilindro. Posteriormente con **Extrusión Corte** se ha eliminado el material en ambos sentidos y hasta una profundidad especificada.

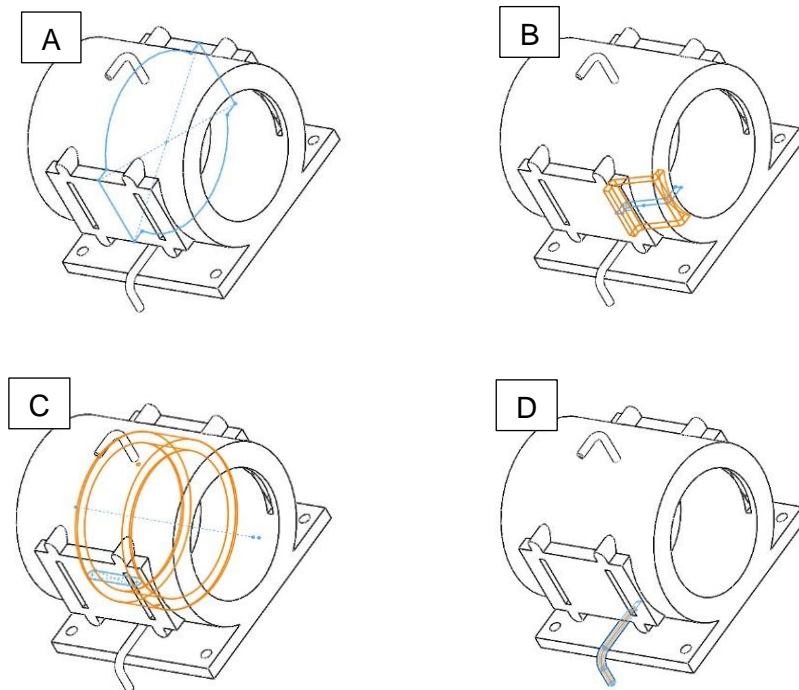


Figura 16: Ejemplos de operaciones 3D (I)

La cavidad de refrigeración por agua del cilindro se ha realizado con una **revolución corte**, utilizando el eje central del cilindro y el contorno cerrado del croquis en azul mostrado en la figura 16C.

La salida del agua señalada en la figura 16D, se ha diseñado haciendo una operación **barrer lámina** que ha construido una tubería solicitando previamente el radio externo e interno y usando como eje la línea.

En la figura 17A se muestra el croquis de la base de una de las válvulas, realizada con circunferencias concéntricas. Este ha servido para hacer la **extrusión** de la mitad de la válvula. En naranja se indica el croquis usado para realizar la **extrusión corte** de la cavidad central.

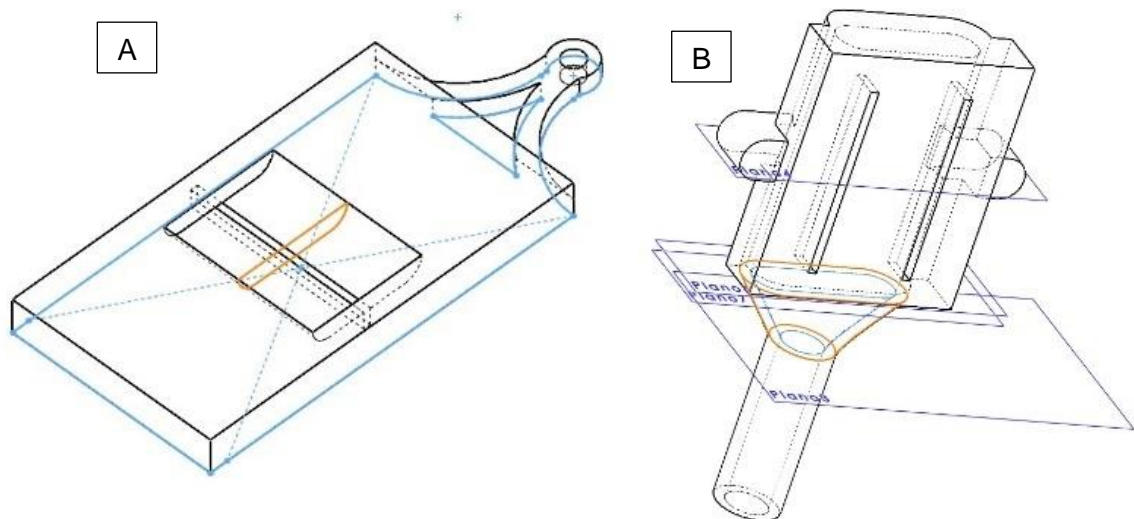


Figura 17: Ejemplos de operaciones 3D (II)

El embudo de la entrada de gases que se muestra en 17B se ha realizado dibujando dos croquis, trazos en naranja, sobre dos planos equidistantes, plano 3 y plano 7, creados previamente con la operación **plano** y posteriormente se ha realizado una operación de **recubrir** de los dos perfiles creando la superficie exterior. De forma similar con los croquis en azul y la operación **corte recubierto** se ha realizado la cavidad del embudo.

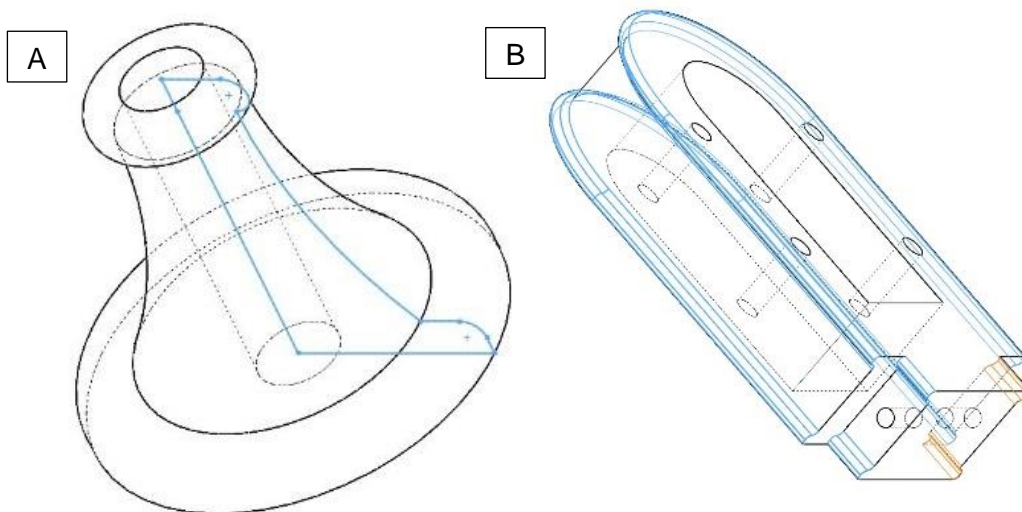


Figura 18: Ejemplos de operaciones 3D (III)

La figura 18A muestra como se ha realizado la base de las guías de cruceta utilizando la operación de **revolución** sobre el eje central de la base.

En las aristas de la bancada del motor se ha utilizado el **redondeo** tal como se muestra en 18B.

Para diseñar el cigüeñal se ha utilizado un *cortar con superficie* para darle una inclinación a las caras laterales. La cara cortada viene representada por el perímetro en naranja en la figura 19. La superficie que ha hecho el corte es el plano 7 que forma un ángulo con el plano vertical de referencia, plano 6.

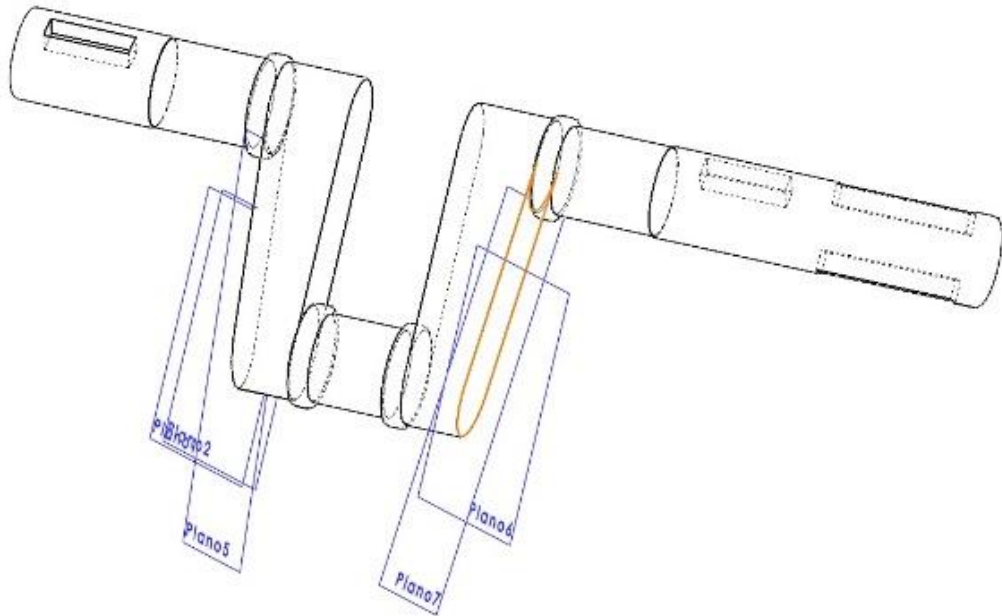


Figura 19: Ejemplo de operaciones 3D (IV)

Por último, se ha utilizado *texto* para hacer un corte con una profundidad determinada y crear el rótulo de la figura 20.

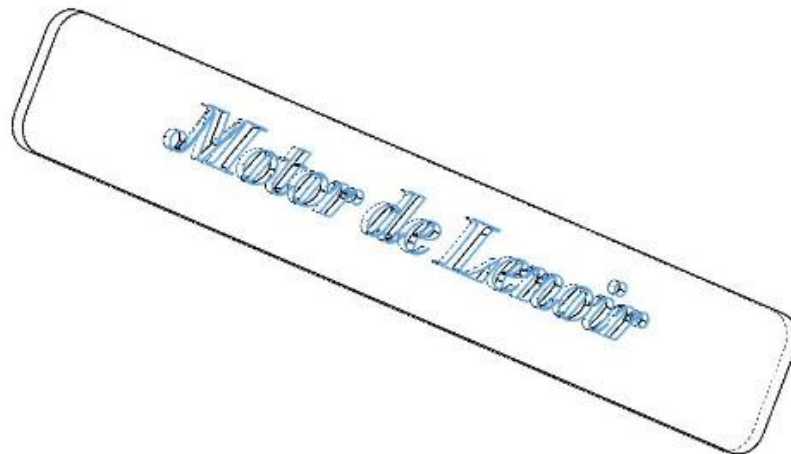


Figura 20: Ejemplo de operaciones 3D (V)

3.2.2 Ensamblaje.

Un ensamblaje es un conjunto de piezas que permiten simular la unión entre ellas mediante relaciones de posición.

Para realizar el ensamblaje, primero hay que importar las piezas y posteriormente se definen las relaciones de posición.

Durante la operación de importar se permite girar la pieza en la posición adecuada para enlazarla con el resto de piezas.

Para crear la relación de posición se elige un elemento (cara, arista, etc...) de una pieza y de la otra y posteriormente se elige la relación de posición entre los dos elementos.

En la tabla 3 se indican las relaciones utilizadas en el ensamblaje del motor.







RELACIÓN DE POSICIÓN	DESCRIPCIÓN
 Coincidente	Posiciona la caras, aristas, puntos, etc, de las piezas en contacto.
 Paralela	Establece relación de paralelismo entre líneas, planos de las piezas.
 Perpendicular	Situa en perpendicular aristas y planos de las piezas.
 Tangente	Posiciona una superficie circular en contacto (tangente) con otra plana.
 Concéntrica	Hace coincidir los centros de elementos circulares.
 Bloquear	Fija dos piezas manteniendo las mismas distancias entre ellas.

Tabla 3: Relaciones de posición en ensamblajes.

Una pieza también se puede marcar como fija y en ese caso no es posible su movimiento. La primera pieza que se introduce suele marcarse como fija. Es necesario diferenciar esta situación del bloqueo entre dos piezas; las dos piezas bloqueadas entre sí no pueden cambiar la posición relativa entre ellas; pero lo pueden hacer conjuntamente.

Los ensamblajes de un subconjunto de piezas se han utilizado frecuentemente para comprobar el correcto encaje en los mecanismos. Por ejemplo, en la figura 21 se puede ver la unión del pistón y la biela con la cruceta mediante el eje del pistón. La cruceta se mueve a través de unas guías que están atornilladas a una base.

El ensamblaje se ha realizado con relaciones *concéntricas* para ajustar ejes y tornillos en los agujeros de las piezas que atraviesan; se han utilizado relaciones de *coincidencia* para posicionar la cruceta en sus guías, las caras de las guías en contacto entre sí, la guía inferior con la cara de la base, etc.

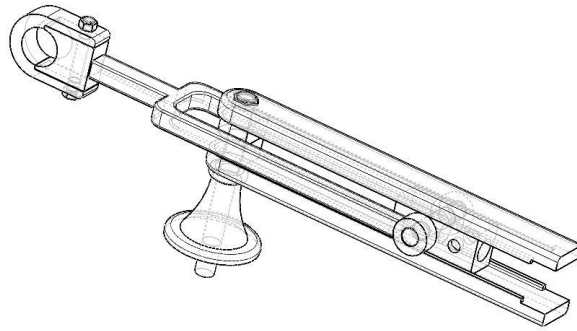


Figura 21: Ejemplo de ensamblaje.

3.4 Reparación de la impresora e impresión 3D.

La impresora 3D usada para realizar la maqueta ha sido la del taller de motores térmicos de la marca Tronxy, modelo X5SA, con una medida de la base de trabajo de 330mm x 330mm y una altura de 400mm y que utiliza un filamento de 1,75mm.

La impresora presentaba una avería desde hace tiempo. Una de las primeras actividades ha sido leer los manuales y la documentación técnica sobre fallos de este tipo de impresora con el objeto de determinar la avería.



Figura 22 Impresora 3D Tronxy.

En primer lugar, se descargó en la página web de Tronxy el manual completo del modelo X5SA, que incluía tanto el proceso de montaje completo como la manera de ponerla en funcionamiento. [11]

De nuevo tuvo soporte a este manual videos ilustrativos en YouTube que incluían información sobre el desembalaje y la configuración de la impresora. [12]

Con esta documentación se obtuvieron los conocimientos suficientes para entender el funcionamiento de la impresora y localizar el fallo para luego solucionarlo.

Inicialmente, se limpió y conectó la impresora. La prioridad era conocer en qué estado se encontraba la impresora y donde tenía los fallos. Para ello se imprimió un anillo de 2 cm de radio y 2 cm de altura. Nada más dar comienzo a la impresión era evidente que existía una calibración incorrecta tanto del eje z como de la cama térmica. El nivel entre la boquilla y la base no permitía la extrusión del material al estar muy próximos. Para solucionarlo, se procedió a regular la altura manualmente dejando un espacio del grosor de una hoja de papel, tal y como se indica en los manuales. Respecto a la cama térmica, mediante el medidor de nivel automático que presenta la impresora, se comprobó que estaba inclinada, proporcionando valores muy dispares en varios puntos. Se ajustó los distintos tornillos con muelle que presenta la base, haciendo que todos los puntos estén nivelados.

Una vez realizados estos dos sencillos procedimientos de mantenimiento, se volvió a intentar la impresión del anillo. El resultado no fue satisfactorio, obteniendo una pieza con apenas la estructura deseada. Mediante este anillo se llegó a la conclusión de que la impresora no extruía suficiente material. Esto, junto a la falta de adhesividad de la base, provocaba que las capas no se pegasen bien entre sí.

Se decidió cambiar la boquilla por una nueva. Se tuvo que quitar el ventilador integrado a la boquilla para después desmontar esta misma de los ejes permitiendo su libre manipulación. Al desarmar este sistema, se observó que una gran cantidad de teflón se había depositado sobre el bloque calentador. Para ablandarlo y eliminarlo, se calentó el sistema a unos 240 °C , facilitando así su supresión.

Una vez eliminado, se cambió la boquilla con el uso de una llave inglesa y una de boca fija.

Para la falta de adhesión en la capa térmica, se compró un pegamento especial para ello.

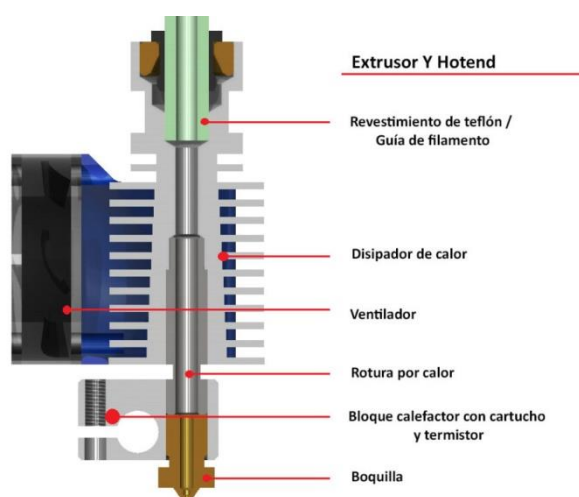


Figura 23: Esquema del cabezal de la impresora.

El siguiente paso consistió en volver a intentar imprimir el anillo. En esta ocasión la máquina extruía correctamente, pero en mitad de la impresión hubo un fallo en el sistema de alimentación de material.

Se observó que en el pasado se había instalado un kit de alimentación *Dual Drive Extruder*, que permitía alimentar el filamento de una forma automática. Para saber si el problema venía de este sistema, se tuvieron que desmontar todas las partes de este kit y realizar manualmente la alimentación del hilo. Con la correcta extrusión del material se determinó que efectivamente el problema se encontraba en este accesorio.

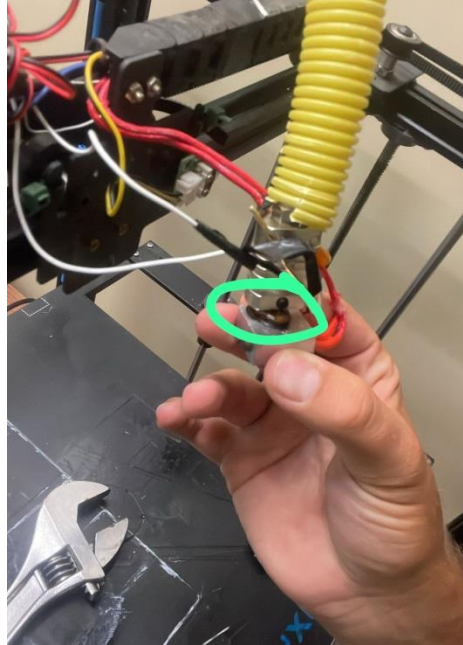


Figura 24: Masa de teflón en la base calentadora.

Tras el estudio y la realización de multitud de pruebas, se determinó que el problema surgía por el desgaste en el extremo del tubo de plástico de alimentación. El tubo está conectado con el motor de alimentación del filamento mediante una conexión que permite el deslizamiento del tubo hacia un sentido impidiéndolo hacia el contrario. De esta forma, cuando la máquina se alimenta de filamento, se permite el movimiento del hilo pero no del tubo de alimentación. Éste, al estar muy desgastado, se movía junto al filamento produciendo el bloqueo del material. Para solucionarlo, simplemente se cortó la parte del tubo desgastado y se procedió a volver a montar todo el sistema.

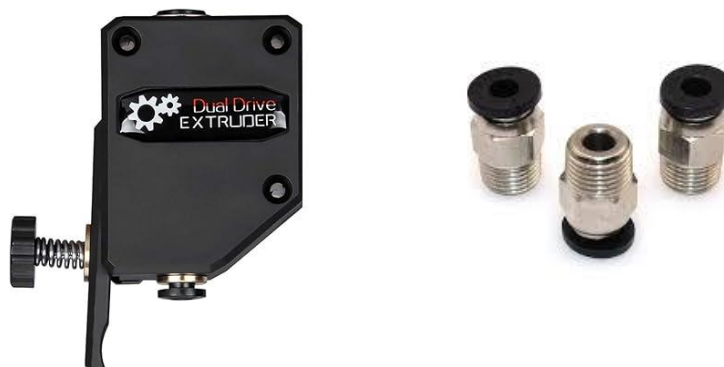


Figura 25: Dual Drive Extruder y conectores neumáticos.

A continuación, se procedió a imprimir el anillo, esta vez consiguiendo un resultado excelente. Ya se podía iniciar con la impresión de las piezas del motor.



Figura 26: Anillos impresos antes y después de la reparación.

Al cerrar la universidad en agosto y con el objetivo de cumplir los plazos para la entrega de este proyecto, se completó la impresión de las piezas restantes en una nueva impresora. Esta impresora se trataba de una *Anycubic Kobra 2 PRO* cuyas características destacan, teniendo unas dimensiones de impresión de 250 x 220 x 220 mm y una velocidad que llega hasta a 500 mm/s. Esto ha permitido completar la fabricación del motor asegurando las dimensiones y tolerancias diseñadas sin la necesidad de tener que fabricar ninguna pieza por partes, excepto la bancada, que no entraba en ninguna de las dos impresoras.

En cuanto a la documentación utilizada en relación con esta impresora cabe destacar el manual de instalación, incluido en la compra. Se utilizó también un video ilustrativo para completar y facilitar su instalación. [13]

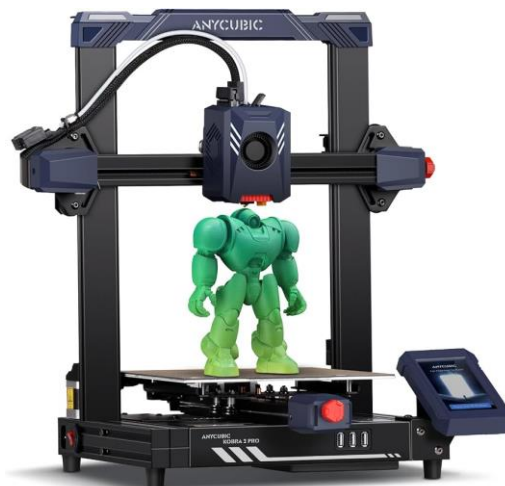


Figura 27: Impresora Anycubic Kobra 2 Pro.

3.5 Impresión de piezas.

SolidWorks guarda las piezas en un formato 3D propietario denominado *SOLIDWORKS Part Document (.SLDPRT)*, aunque permite importar o exportar en una variedad de formatos 3D. El formato más usado es el STL.

Pero estos formatos de diseño no los pueden utilizar directamente las impresoras 3D. El lenguaje que utilizan es el *G-code*, en formato texto. El fichero en formato G-code incluye instrucciones como dónde se debería posicionar el cabezal de la impresora, que trayectoria debería seguir y lo rápido que lo tendría que hacer, entre otras cosas.

Un ejemplo del lenguaje G-code se encuentra en la figura 28. Por ejemplo, los Gxx son los comandos que se envían a la impresora. Los códigos X, Y, Z indican las coordenadas donde debe situarse el cabezal de la impresora, el código F la velocidad de desplazamiento y el E la longitud a extruir.

```

;TYPE:Custom
G90 ; use absolute coordinates
M83 ; extruder relative mode
M140 S60 ; set bed temp
M190 S60 ; wait for bed temp
M104 S215 ; set extruder temp
M109 S215 ; wait for extruder temp
G28 ; move X/Y/Z to min endstops
G1 Z0.28 ; lift nozzle a bit
G92 E0
G1 Y3 F2400 ; zero the extruded length
G1 X180 E40 F500 ; Extrude 25mm of filament in a 5cm line.
G92 E0 ; zero the extruded length again
G1 E-0.2 F3000 ; Retract a little
G1 X181 F4000 ; Quickly wipe away from the filament line
M117
G21 ; set units to millimeters
G90 ; use absolute coordinates
M82 ; use absolute distances for extrusion
G92 E0
M107
;LAYER_CHANGE
;Z:0.24
;HEIGHT:0.24
; BEFORE_LAYER_CHANGE 0 @ 0.24mm
G1 Z.24 F18000
; AFTER_LAYER_CHANGE 0 @ 0.24mm
G1 E-2.5 F4800
G92 E0
M204 S20000
G1 X35.718 Y77.702 F18000
G1 E2.5 F4800
M204 S5000
;TYPE:Skirt/Brim
;WIDTH:0.5
G1 F1200
G1 X36.218 Y77.487 E2.52387
G1 X36.749 Y77.383 E2.5476
G1 X147.31 Y77.387 E7.39637
    
```

Figura 28: Ejemplo de comandos G-code.

Es necesario un programa que convierta el formato 3D a *G-code*. Se averiguó que el programa más utilizado hoy en día para la impresión en 3D era el *UltiMaker Cura*, un software de corte (*slicer*) que transforma los ficheros en diferentes formatos 3D (*STL*, *OBJ*, *3MF*), elaborados con cualquier software de diseño, en ficheros en formato *G-code*.



Este tipo de programas se denominan *slicer*, cuyo significado en castellano es rebanador. Se denominan así porque dividen la pieza en capas horizontales que la impresora puede construir secuencialmente.

El *slicer* también crea soportes para imprimir las partes de la pieza que se encuentran sin apoyos.

Inicialmente hay que indicarle a la aplicación el modelo de

Figura 29: Logo de Cura

impresora. El software dispone de una extensa base de datos con las impresoras en el mercado. Esta configuración previa permite adecuar los comandos G-code a las características de la impresora.

Dispone de una interfaz más que intuitiva que puede realizar ajustes sobre la posición, rotación y escala de la pieza, presentando una previsualización de cómo quedaría la pieza en el plato de la impresora. En la figura 30 se puede ver un ejemplo que incluye el tiempo estimado de impresión de la pieza y los gramos y longitud del filamento consumido.

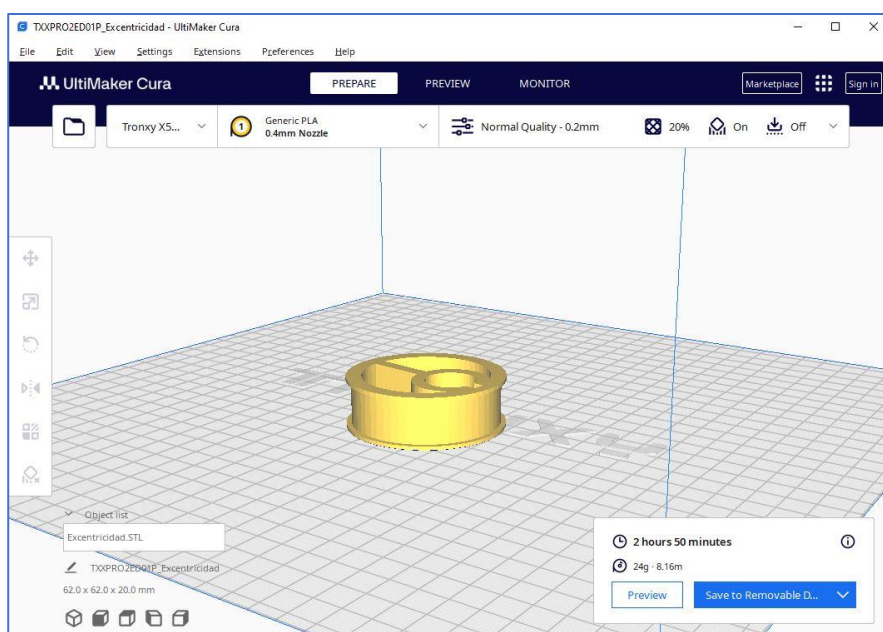


Figura 30: Ejemplo utilización de Cura

Una de las ventajas más destacables del Cura es la cantidad de parámetros que se pueden modificar. Esto permite adecuar las propiedades de impresión dependiendo de los atributos que debe tener la pieza. Se puede ajustar la altura de capa, la densidad de relleno, los soportes de impresión, entre otros muchos parámetros, tal como aparece en la figura 31.

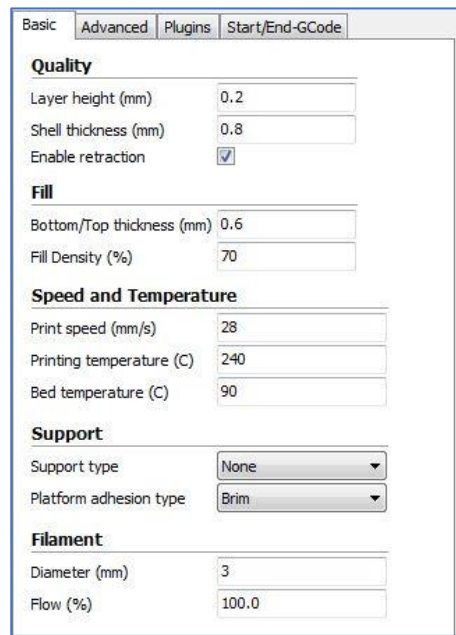


Figura 31: Configuración básica de Cura.

La elección de los parámetros de impresión tiene un gran peso sobre los resultados del proyecto, no solo para obtener una buena calidad en el acabado superficial, característica muy importante en un mecanismo tan complejo como el de un motor donde las tolerancias pueden ser un aspecto decisivo en su funcionamiento, sino también en el tipo y cantidad de material a utilizar. Estas dos últimas elecciones son esenciales, puesto que buscamos un material lo suficientemente resistente que pueda soportar los esfuerzos de la maqueta. Además, hay que fijar la densidad adecuada para conseguir la mejor eficiencia en ahorro de material, tiempo y compactibilidad.

En primera estancia, para poder comprobar todos estos atributos se consultó el manual de instalación y uso del *Ultimaker Cura* [14]. Este manual incluye dos apartados de gran interés y utilidad para el proyecto. Uno de ellos es el ajuste de parámetros que describe los diferentes parámetros predefinidos. Entre ellos se encuentra una escala de modos ofrecidos por el propio programa que van desde *extra fine quality*, con un espesor del hilo depositado de 0,12mm, pasando por *normal quality*, con espesor de 0,2mm, hasta *rough quality*, con 0,3mm.

El segundo apartado cuenta sobre los problemas principales que puede tener la impresora a la hora de imprimir y que parámetros se pueden modificar en el programa para invertirlos.

El manual recomienda imprimir inicialmente un cubo de 2cm x 2cm y, a partir del resultado, ir calibrando. Se utilizaron como base los parámetros predeterminados del modo *normal quality* dando un resultado más que aceptable. Esta calidad de 0,2 mm de espesor incluye por defecto una densidad de relleno del 20%, suficiente para soportar los esfuerzos provocados por el movimiento del propio motor, una velocidad de 60 mm/s de impresión y una temperatura de

boquilla de 200° C y de 50° C para la mesa térmica. En la figura 32 se muestra la configuración de Cura para la impresión de la mayoría de las piezas en la impresora *Tronxy X5SA*.

Section	Parameter	Value	Unit
Quality	Layer Height	0.2	mm
Walls	Wall Thickness	0.8	mm
	Wall Line Count	3	
	Horizontal Expansion	0.0	mm
	Top/Bottom		
Top/Bottom	Top/Bottom Thickness	0.8	mm
	Top Thickness	0.8	mm
	Top Layers	4	
	Bottom Thickness	0.8	mm
	Bottom Layers	4	
Infill	Infill Density	20.0	%
	Infill Pattern	Cubic	
	Material		
Material	Printing Temperature	200.0	°C
	Build Plate Temperature	55	°C
Speed	Print Speed	60.0	mm/s
Travel	Enable Retraction	<input checked="" type="checkbox"/>	
	Z Hop When Retracted	<input checked="" type="checkbox"/>	
	Cooling		
Cooling	Enable Print Cooling	<input checked="" type="checkbox"/>	
	Fan Speed	100.0	%
Support	Generate Support	<input type="checkbox"/>	
Build Plate Adhesion	Build Plate Adhesion Type	Skirt	

Figura 32: Parámetros de configuración en Cura para Tronxy X5SA.

En las piezas más pequeñas como tornillos y ejes se decidió cambiar la densidad de relleno a 100% para hacerlas más resistentes.

Con la segunda impresora, como Cura no reconocía el modelo *Anycubic Kobra 2 PRO* y el fabricante ofrece su propio software *slicer* centrado exclusivamente en sus impresoras, se decidió utilizarlo.

Este software permite exprimir las características de la impresora y alcanzar sus velocidades nominales.

Inicialmente hubo varios intentos fallidos de fabricación por la falta de agarre de la pieza o de los soportes a la placa de la impresora. La velocidad excesiva del cabezal en las primeras capas era una de las causas, así que se configuró una velocidad de impresión de la primera capa de 20 mm/s y se utilizó adhesivo.

Adicionalmente en algunas piezas con poca base se configuró *Brim*, un borde en la base, y se usó el método *Raft* que crea una capa que compensa los desniveles de la placa de la impresora y aumenta la base de contacto. En algunas piezas de muy poca base y muy alargadas se construyó una base adicional muy fina que posteriormente se recortó.

Para las siguientes capas la velocidad máxima de extrusión era 300 mm/s, permitiendo una buena calidad en las piezas en un tiempo reducido. En cuanto a la densidad se siguió el mismo patrón que en la primera impresora, 100% de densidad para ejes y tornillos y 20 % para el resto.

The image shows a screenshot of the Anycubic Kobra 2 Pro printer's settings interface. The settings are organized into several sections:

- Layer height:** Layer height: 0.2 mm, First layer height: 0.24 mm.
- Vertical shells:** Perimeters: 2 (minimum), Spiral vase: . Recommended object thin wall thickness for layer height 0.20 and 2 lines: 0.80 mm, 3 lines: 1.20 mm, 4 lines: 1.61 mm.
- Horizontal shells:** Solid layers: Top: 4, Bottom: 3. Minimum shell thickness: Top: 0.6 mm, Bottom: 0 mm. Top shell is 0.8 mm thick for layer height 0.2 mm. Minimum top shell thickness is 0.6 mm. Bottom shell is 0.6 mm thick for layer height 0.2 mm. Minimum bottom shell thickness is 0.24 mm.
- Infill:** Fill density: 20%, Fill pattern: Triangles, Top fill pattern: Monotonic, Bottom fill pattern: Monotonic.
- Skirt:** Distance from brim/object: 5 mm.
- Brim:** Brim type: Outer brim only, Brim width: 3 mm.
- Raft:** Raft layers: 1, Raft contact Z distance: 0.1 mm, Raft expansion: 1.5 mm.
- Autospeed (advanced):** Max print speed: 300 mm/s, Max volumetric speed: 0 mm³/s.
- Modifiers:** First layer speed: 20 mm/s or %, Speed of object first layer over raft interface: 30 mm/s or %.

Figura 33: Configuración de parámetros de impresión en Anycubic Kobra 2 Pro.

Una vez fijados todos los parámetros se realizó una prueba de holguras para determinar el espacio que se debería dejar entre las piezas que irían unidas. La prueba consistió en imprimir un eje de 2 cm de diámetro y anillos con diferentes holguras. Con esto se determinó que medidas eran las adecuadas para las distintas piezas concéntricas del motor para asegurar el ajuste con movimiento, en los ejes que giran, y cuál era la holgura para tornillos y uniones fijas. Se imprimieron un total de 4 anillos con las siguientes holguras: 0.3, 0.5, 0,7 y 1 mm. Con estos anillos se llegó a las siguientes conclusiones:

- Se utilizaría una holgura de 0,4 mm para todas las piezas coaxiales sin movimiento.
- Un juego de 0,8mm para las piezas de tamaño medio con movimiento rotatorio entre ellas.

- Para piezas de grandes dimensiones con movimiento se utilizó una tolerancia de 1,2 mm



Figura 34 Prueba de impresión para determinar holguras.

La maqueta impresa se ha hecho a una escala reducida del 50% del motor diseñado. Los programas *slicers* han realizado el cambio de escala. Las tolerancias indicadas en el punto anterior son sobre las dimensiones reducidas de las piezas impresas.

4 RESULTADOS

4.1 Diseño del motor.

4.1.1 El cilindro.

El cilindro ha sido uno de los elementos más complejos de diseñar, no tanto por su aspecto exterior, que ha sido relativamente simple de crear, sino por los conductos interno que permiten la entrada de gas y aire, la salida de los gases de combustión y la refrigeración por agua.

En la figura 35 se incluyen dos visiones del cilindro desde un mismo ángulo, una con líneas ocultas visibles y otra sombreada con aristas y el acabado *realview*. La primera nos permite ver el interior de la pieza y la segunda ofrece una visión muy realista de su aspecto exterior.

El cilindro presenta un plano de simetría situado en su centro y perpendicular al eje del cilindro, y por lo tanto la parte delantera derecha y trasera izquierda de la figura 35 son idénticas en su construcción. La apertura de los gases se sitúa al final del recorrido del pistón y discurre en el interior de las paredes hasta las aperturas laterales sobre la superficie de contacto con las válvulas.

Las medidas y posición de las aperturas del cilindro, válvulas y entradas y salidas de gases están relacionados entre sí para permitir un correcto funcionamiento de las fases del motor (ver apartado 4.1.9).

Las paredes del cilindro presentan en su parte central una cavidad de refrigeración por donde circula agua. Dispone de una entrada en la parte superior y una salida en la parte inferior.

La base del cilindro presenta cuatro agujeros para su anclaje a la base del motor.

Para el diseño del cilindro se ha utilizado una variedad de operaciones tridimensionales a destacar, corte con revolución utilizando el eje del cilindro para la cavidad de refrigeración, diferentes planos para realizar los cortes de los conductos de entrada y salida; en total más de 21 croquis y operaciones 3D.

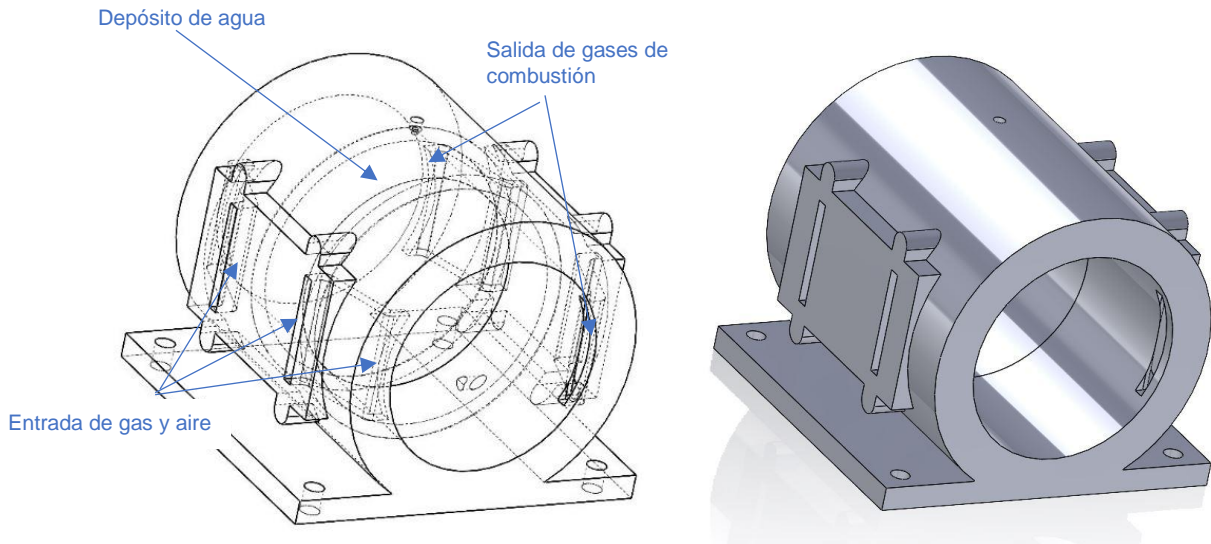


Figura 35: Diseño del cilindro.

El cilindro queda herméticamente cerrado por sus tapas mostradas en la figura 36, que presentan un saliente para su encaje en el interior del cilindro. También se pueden ver los dos encendedores que provocan la explosión de los gases.

La tapa de la derecha presenta la apertura para el pistón y salientes que sirven de soporte a las guías de cruceta.



Figura 36: Tapas del cilindro.

4.1.2 Las entradas de aire y gas, y salida de gases de combustión.

En la figura 37 se representan las entradas de aire y de combustible. El tubo de aire se encuentra en la parte superior y tiene una apertura hacia la válvula en su parte inferior. El tubo de combustible se encuentra en la parte inferior y contiene dos aperturas hacia la válvula que suministra combustible a una u otra cavidad del cilindro.

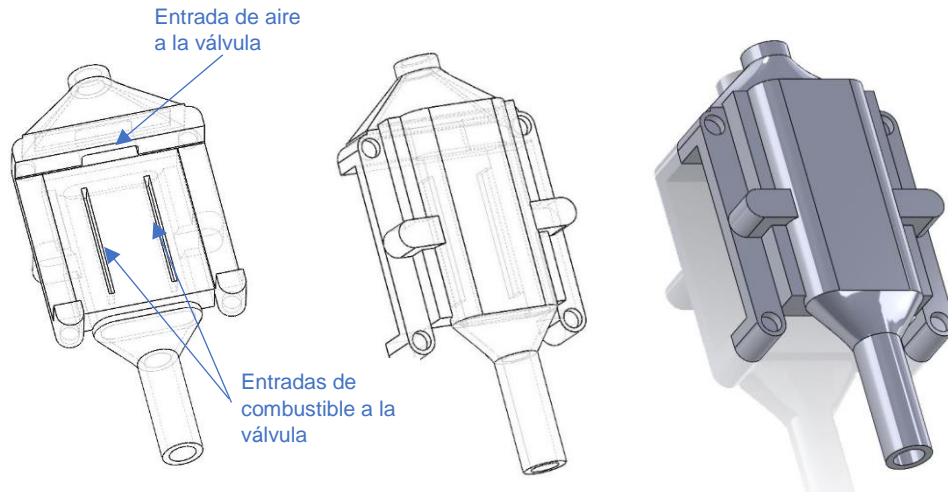


Figura 37: Entrada de aire y combustible.

La salida de los gases de combustión mostrada en la figura 38 está hueca en la parte de contacto con la válvula. En la parte superior presenta un tubo que puede ser expandido y de este modo puede canalizar los gases de escape.

Las dos piezas han sido laboriosas en su diseño, habiendo sido necesario definir múltiples planos de trabajo, extrusiones, cortes con extrusión, cortes con recubrimiento, recubrir perfiles, etc...

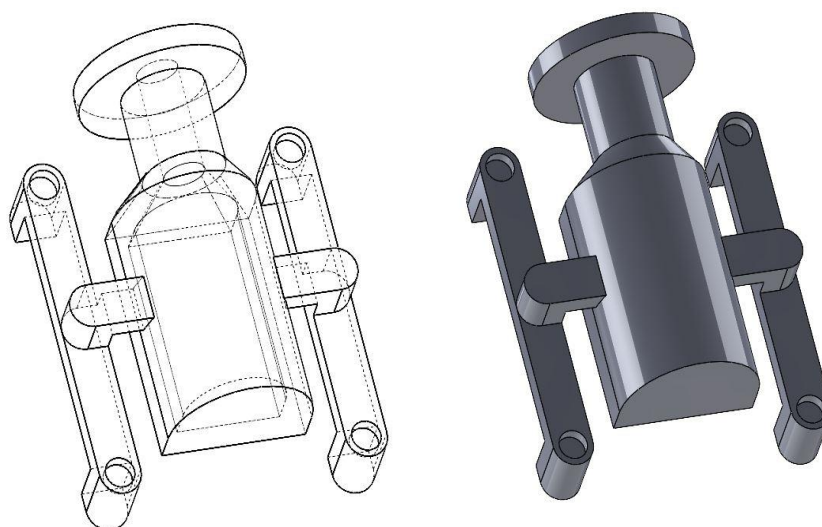


Figura 38: Salida de gases de combustión.

4.1.3 El pistón y las guías de cruceta.

En la figura 39 se muestran cuatro piezas, el pistón con un perno que lo fija a la cruceta y el eje del pistón con la biela.

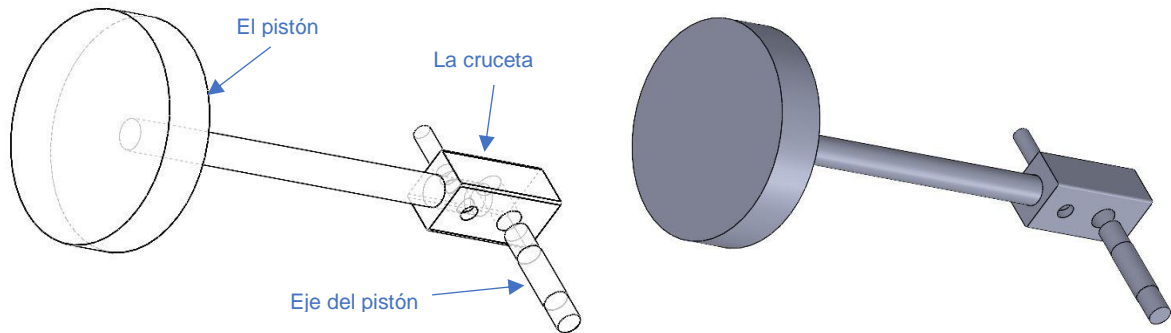


Figura 39: El pistón y la cruceta.

La cruceta conecta el vástago del pistón con la biela y permite al pistón recorrer el cilindro en línea recta. La cruceta se desliza por las guías que llevan su nombre.

En la figura 40 se incluyen las cuatro piezas que forman la guías: la guía superior e inferior, la base y el tornillo que lo fija a la bancada.

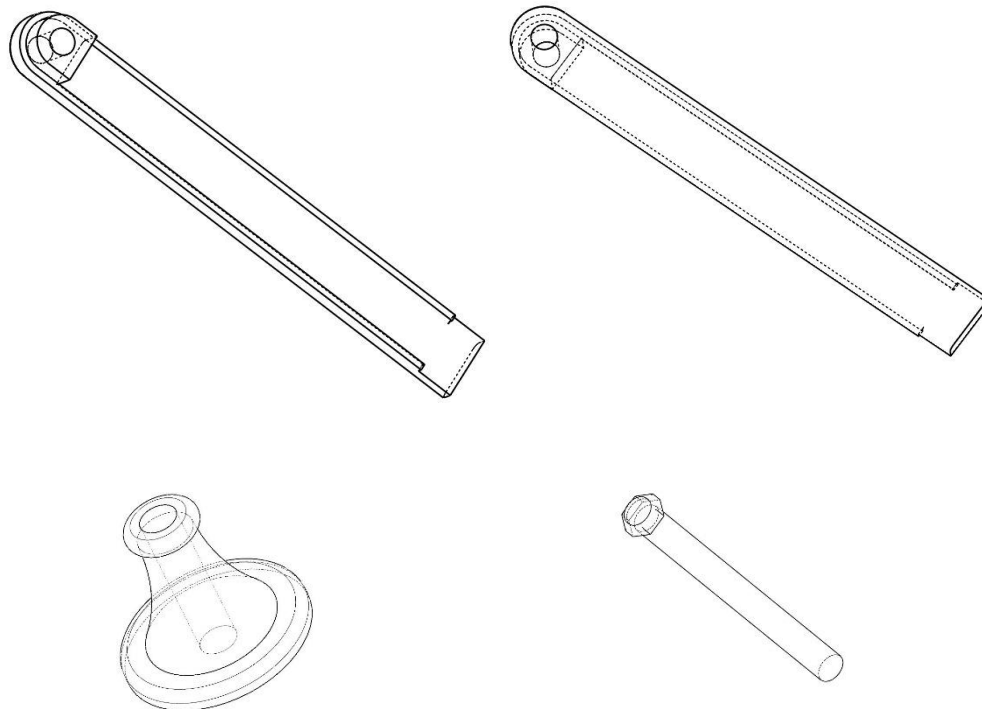


Figura 40 Piezas de las guías de cruceta.

Las guías evitan que el pistón se mueva de un lado a otro protegiendo al cilindro de fuerzas laterales producidas por la biela que puedan dañarlo. En la figura 41 se puede apreciar el ensamblaje del conjunto.

La base de las guías se ha realizado con una operación de revolución. Las aristas de las guías de cruceta se han redondeado.

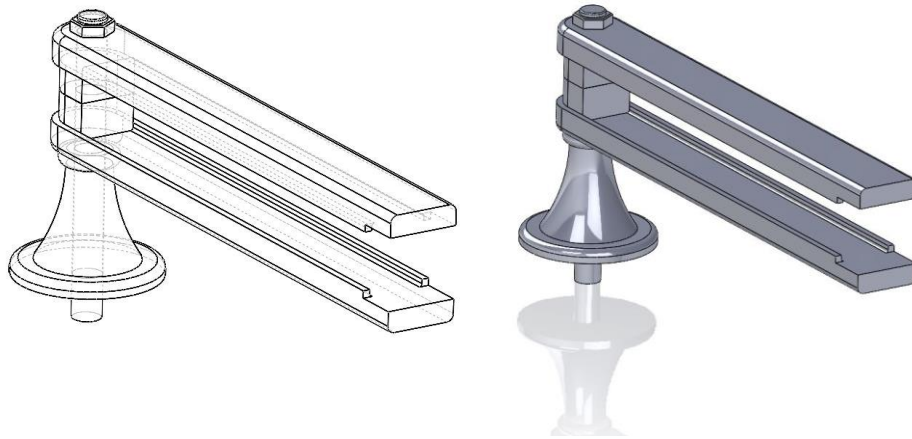


Figura 41: Ensamblaje de las guías de cruceta.

4.1.4 La biela.

La biela transmite el movimiento longitudinal del pistón al cigüeñal que lo convierte en un movimiento circular. En la figura 42 se muestra un ensamblaje de la biela formado por tres piezas diferentes: la parte superior de la biela (sombbrero), el cuerpo de la biela y un perno que une las dos partes.

El orificio superior de mayor tamaño aloja un cojinete y abraza al cigüeñal. Por los orificios inferiores de menor tamaño se introduce el eje del pistón que lo une con la cruceta y el pistón vistos anteriormente.

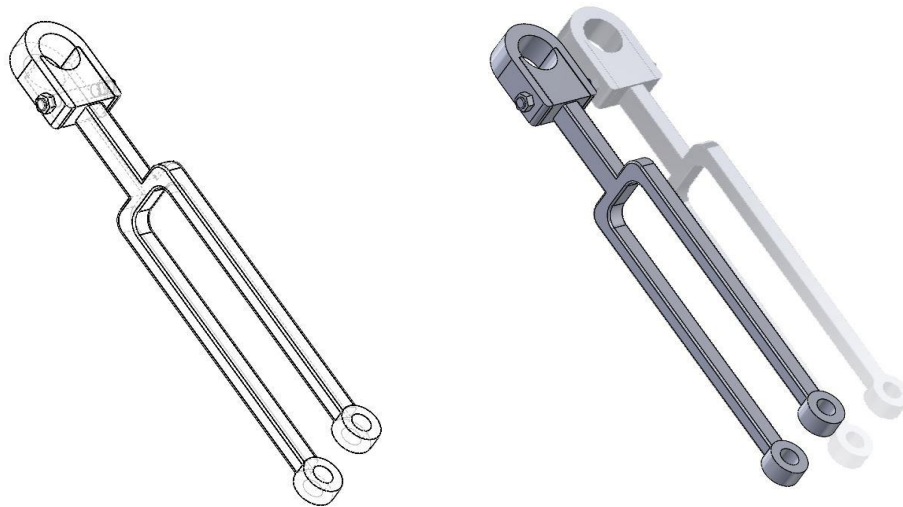


Figura 42: La biela.

4.1.5 El cigüeñal.

El cigüeñal junto con la biela convierte el movimiento longitudinal del pistón en circular. Este movimiento circular se transmite mediante un par a otros elementos mecánicos que permiten mover la máquina o vehículo.

En este caso no existe una carga específica y al cigüeñal solo están fijadas las excentricidades de las válvulas y el volante de inercia. La biela se abraza en la parte central del cigüeñal.

En la figura 43 se muestran el cigüeñal y las bases con cojinetes que lo fijan con 4 tornillos a la bancada del motor. Los cojinetes se unen al cigüeñal a los lados de la biela.

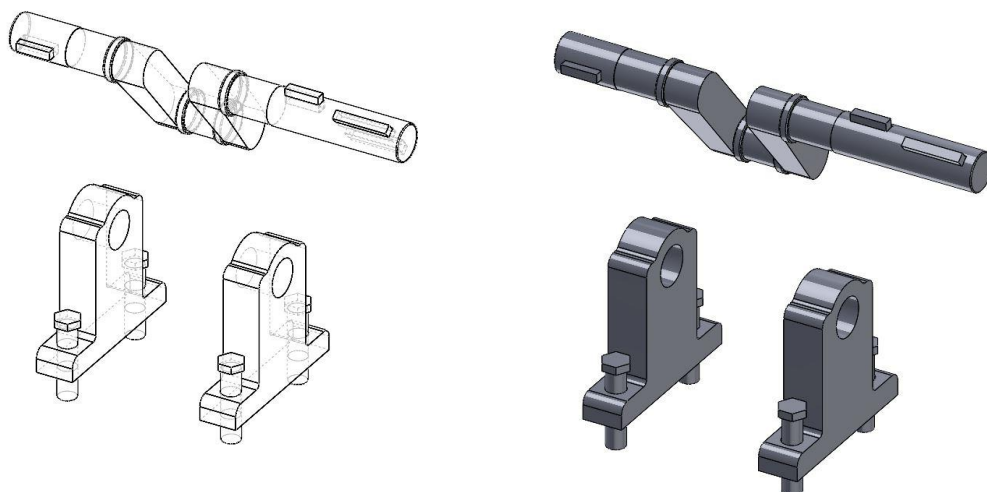


Figura 43: El cigüeñal y los cojinetes

Un aspecto muy importante para la sincronización del motor ha sido fijar con exactitud el ángulo que forma las excentricidades con la biela y el pistón, y que permitirá la apertura y cierre de las válvulas en el instante preciso.

La figura 44 muestra el ensamblaje del cigüeñal y de las dos excentricidades. En ella se indica el sentido del movimiento circular del cigüeñal, el desfase de la excentricidad de la válvula de salida de los gases de combustión, unos 50° de adelanto con respecto al pistón. La excentricidad de la válvula de entrada del aire y del combustible se sitúa unos 35° de retraso con respecto al pistón.

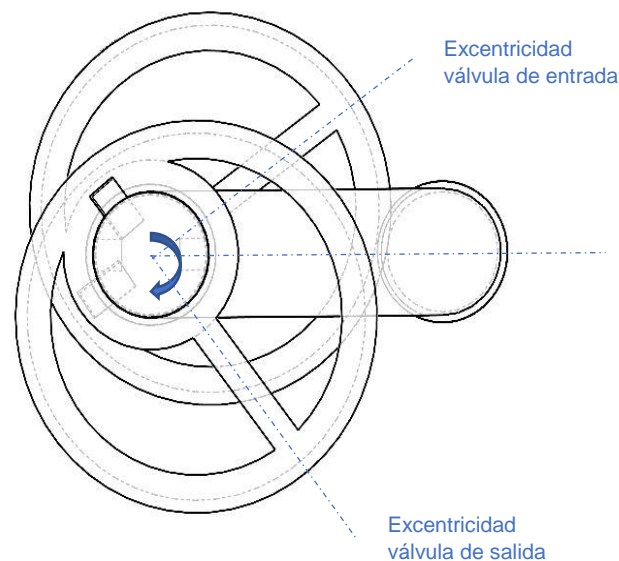


Figura 44: Ángulo de las excentricidades con la biela.

4.1.7 El volante de inercia.

El volante de inercia es una pieza que se lleva utilizando a lo largo de la historia en todo tipo de máquinas, desde los molinos de viento hasta los automóviles más modernos. Esta pieza tiene varias funciones, como almacenar la energía cinética durante la fase de explosión y combustión liberándola en las fases del ciclo en las que no se produce potencia para mantener un giro uniforme y constante del cigüeñal. Otras funciones son reducir las vibraciones del cigüeñal y facilitar el arranque. Este último se consigue gracias a la inercia del volante que permite mantener el movimiento rotacional para poder superar la resistencia del motor durante el arranque.

El momento de inercia con respecto al eje es función de la masa del volante y de la distancia de esta al eje, calculándose de forma general con la siguiente fórmula:

$$I_z = \int_0^R r^2 dm = \int_0^R r^2 \rho 2\pi r dr$$

$dm =$ diferencial de masa

$$r = \text{distancia al centro al eje } z$$

El diferencial de masa se calcula como la densidad del material (ρ) que lo forma por un diferencial de volumen ($2\pi r dr$). Si se supone que toda la masa (M) se concentra en el aro del volante a una distancia R , la formula simplificada sería:

$$I_z = MR^2$$

El momento de inercia se puede aumentar con el radio del volante o utilizando materiales más pesados.

Los volantes de inercia de los motores actuales son discos pesados de reducido tamaño de 25 a 30 cm. En el caso de nuestra maqueta se ha decidido realizar una representación de esta pieza reduciendo en cierta manera su dimensión.

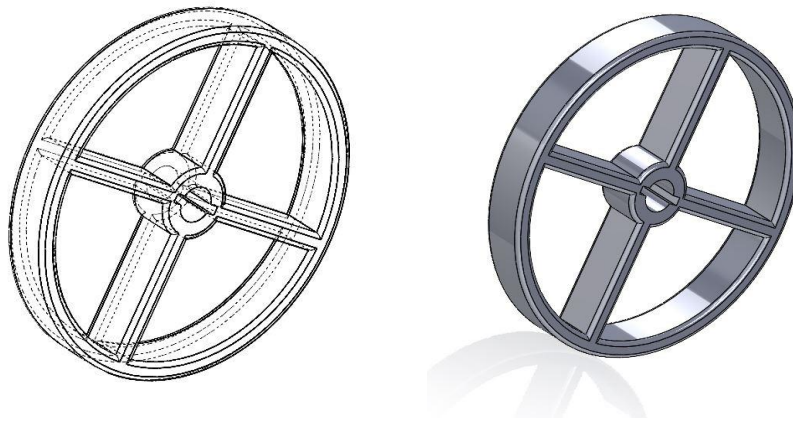


Figura 45: Diseño del volante de inercia.

4.1.8 Las válvulas correderas de entrada y salida de gases.

Las válvulas correderas de entrada y salida abren y cierran la entrada de aire y combustible y la salida de gases de combustión respectivamente. En la figura 46 se pueden ver el conjunto de piezas que forman el mecanismo de entrada y salida de gases: la válvula, la barra, el sombrerete que abraza la excentricidad, los tornillos y la excentricidad.

Las barras, las excentricidades y por supuesto los tornillos son todos iguales. Las válvulas son diferentes y adaptadas a los orificios que presentan los tubos de combustible y aire y el tubo de escape de gases. La válvula de la derecha es la de entrada.

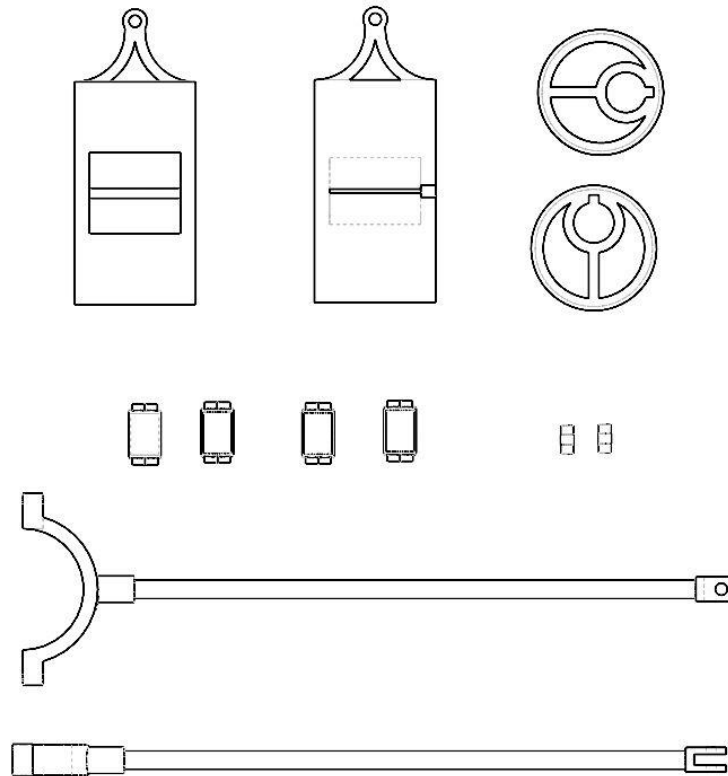


Figura 46: Diseño del mecanismo de entrada y salida de gases.

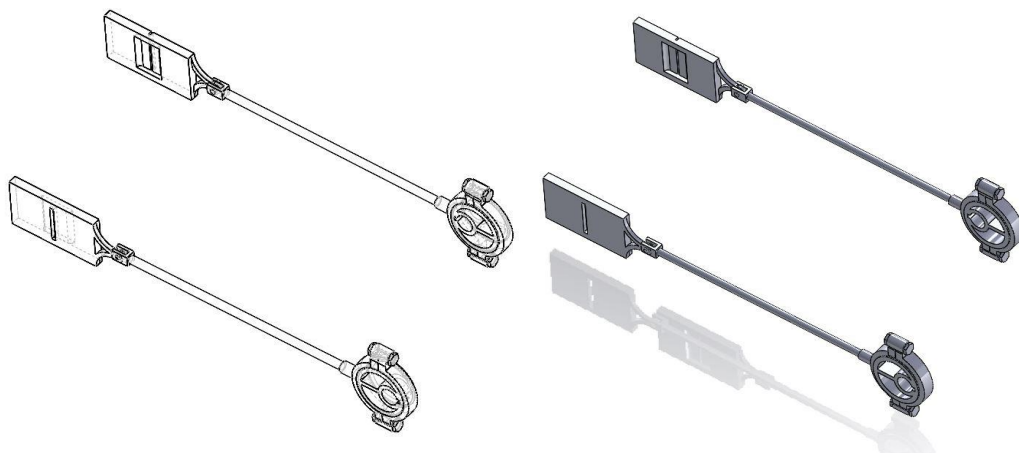


Figura 47 Ensamblaje de las válvulas correderas.

Las válvulas presentan en su parte central una apertura que posibilita la entrada y salida de gases cuando estas coinciden con las ranuras que tienen los tubos de entrada de aire y combustible y de escape que se mostraban en las figuras 37 y 38.

4.1.9 Las fases del motor.

Para mostrar las diferentes fases del motor se ha realizado un corte al cilindro a media altura. El resultado es el mostrado en la figura 48 para diferentes posiciones del pistón.

En los dibujos se puede apreciar como se sincronizan los conductos del cilindro con las ranuras de las válvulas y los tubos de entrada y salida de gases en las diferentes fases del motor.

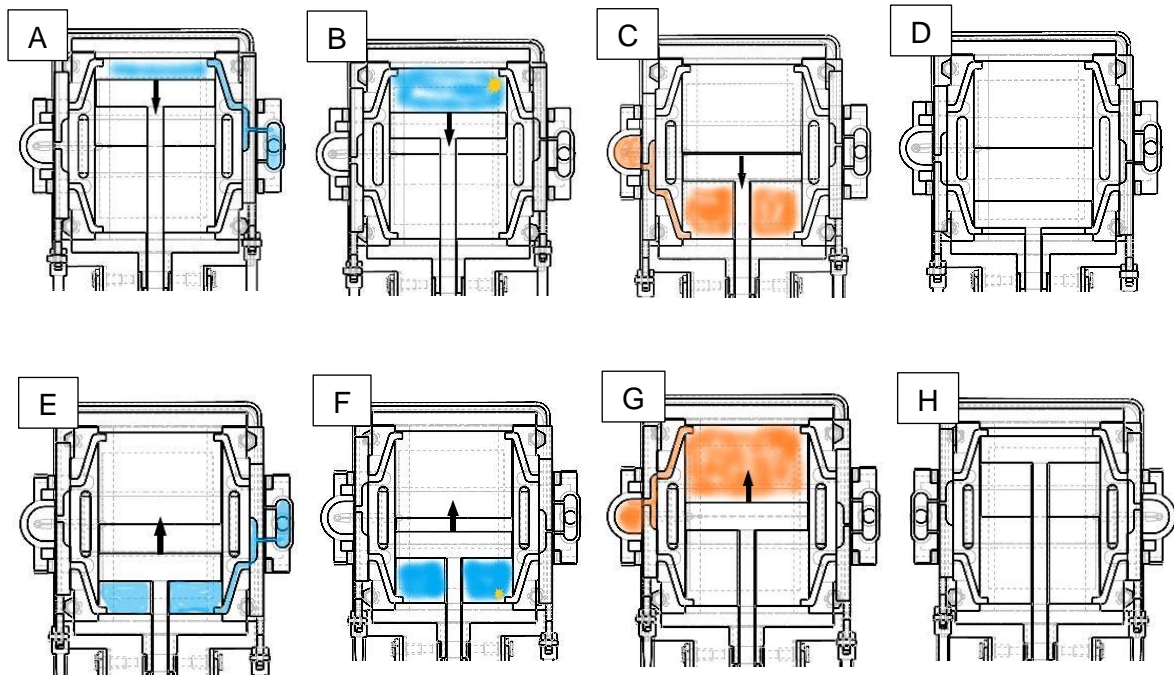


Figura 48: Fases del motor.

El cilindro se divide por el pistón en dos cavidades que operan de manera análoga, la superior se identifica en la explicación como 1 y la inferior como 2. A continuación se describen las diferentes posiciones de la figura 48:

- A) **Fase de admisión 1:** La válvula permite la entrada de combustible y de aire en la cavidad superior, al alinearse las ranuras de los tubos y de la válvula. En azul se indica el combustible.
- B) **Ignición 1:** La válvula de entrada se cierra y en ese instante el encendedor hace explotar el gas combustible.
- C) **Fase de expulsión 2:** La válvula de salida permite la salida de los gases de combustión de la cavidad inferior. En naranja se muestran los gases de combustión.
- D) Cuando el pistón llega el extremo del recorrido se cierra la válvula de salida de gases.

- E) **Fase de admisión 2:** La válvula de entrada permite el flujo de aire y combustible en la cavidad inferior.
- F) **Ignición 2:** Se cierra la entrada de aire y combustible hacia la parte inferior del cilindro y se produce la explosión del combustible.
- G) **Fase de expulsión1:** La válvula de salida permite la expulsión de los gases de la combustión de la parte superior.
- H) Cuando el pistón llega al extremo superior de la figura, se cierra la válvula de salida y comienza un nuevo ciclo.

4.1.10 La bancada del motor.

La bancada sirve de soporte al resto de piezas que componen el motor. Para permitir la impresión sin superar las dimensiones máximas de la impresora 3D, la bancada se ha dividido en tres partes tal como se puede observar en la figura 49.

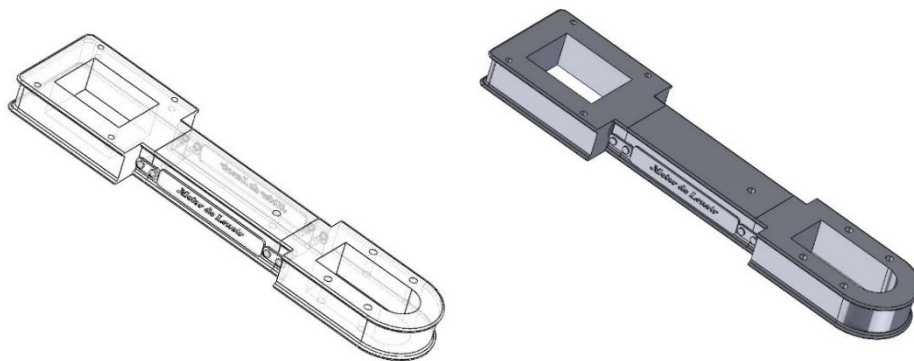


Figura 49: La bancada del motor.

La figura muestra el ensamblaje de la bancada formada por tres partes, 8 tornillos de unión de las partes, cuatro aletas para atornillar y dos rótulos.

Presenta cuatro agujeros para atornillar el cilindro, otro para fijar las guías del pistón y otros cuatro para fijar el cigüeñal. El hueco inferior permite el giro del cigüeñal.

En su diseño se han redondeado las aristas y se ha cortado un rótulo con el nombre del motor.

4.1.11 Ensamblaje del motor.

El ensamblaje del motor se ha hecho según se diseñaban las piezas que lo componen. Ha servido en todo momento de comprobación de que una nueva pieza diseñada se ajustara correctamente con el resto. En muchos casos ha sido necesario modificarla y los cambios se han visto reflejados en el ensamblaje automáticamente.

El motor completo se puede ver en la figura 50 y 51 con líneas ocultas visibles y con sombreado con aristas.

La bancada del motor se ha puesto como pieza fija desde el principio. Otras piezas como el cilindro se han posicionado en la bancada con relaciones de contacto de la cara inferior del cilindro y la superior de la bancada, y con relaciones de concentricidad de los tornillos y agujeros que la unen a la bancada. Una vez situado correctamente en la bancada se ha puesto en situación de pieza fija. Esta última operación permite eliminar las relaciones de posición y simplificar el ensamblaje.

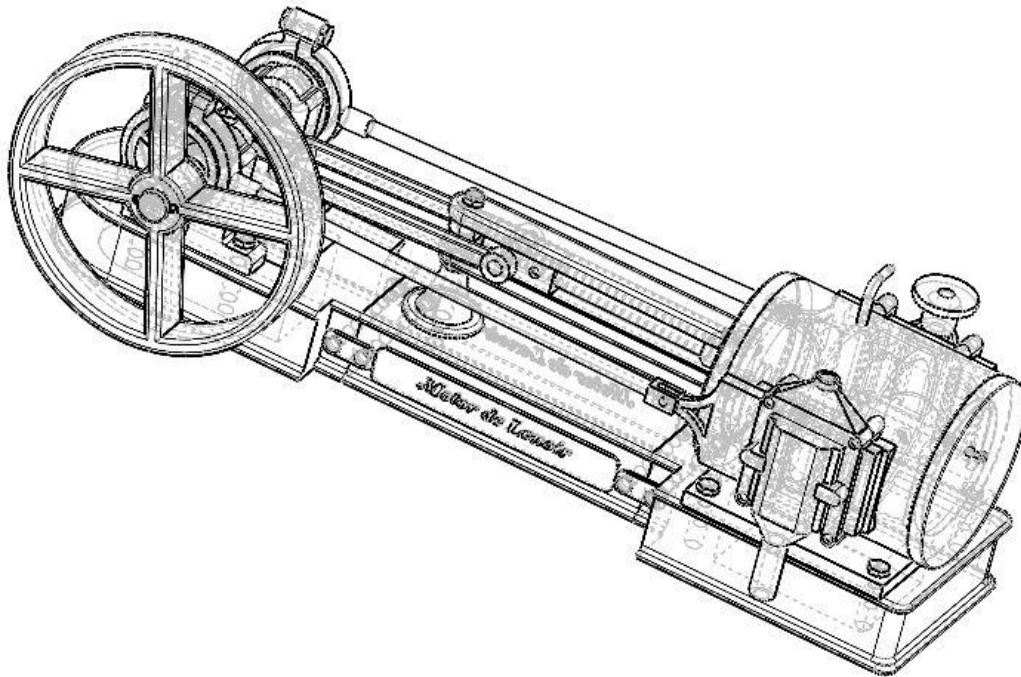


Figura 50: Ensamblaje del motor visto desde la entrada de combustible.

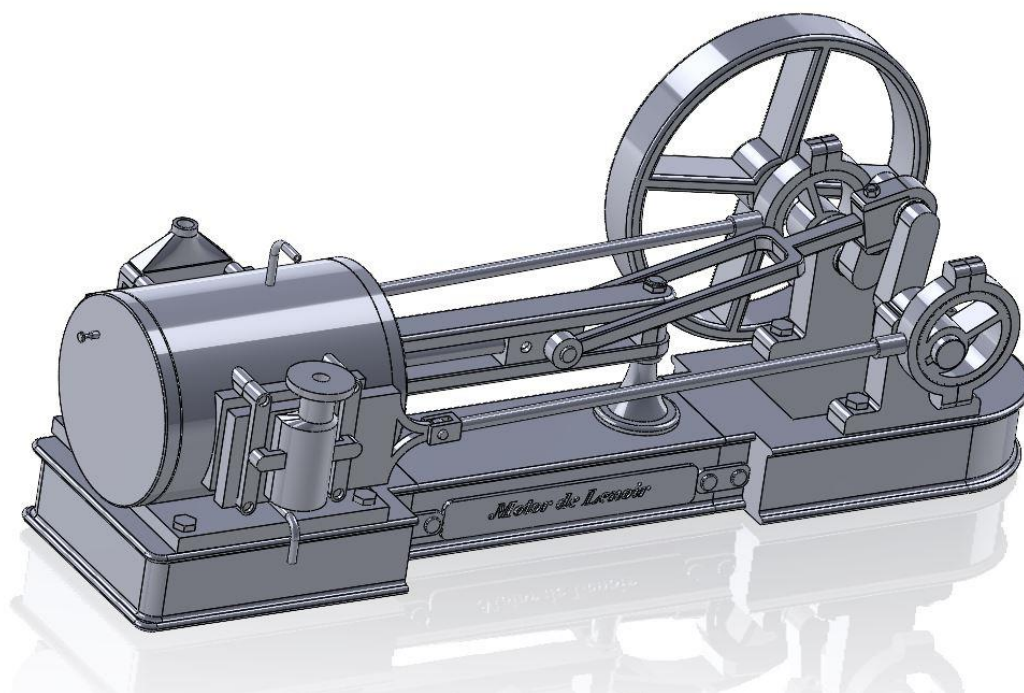
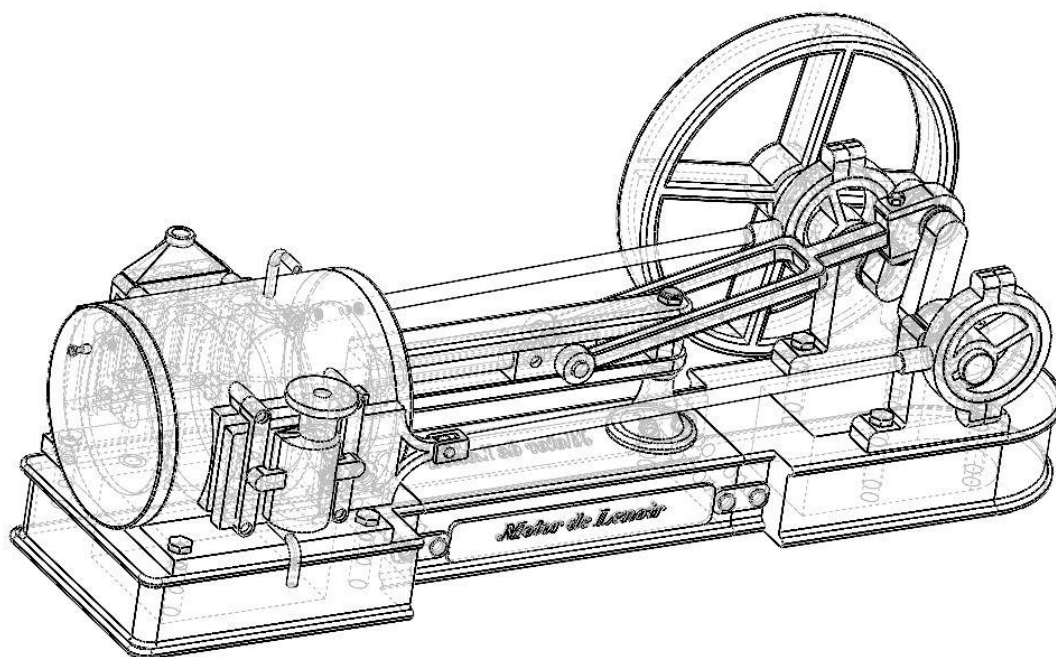


Figura 51: Ensamblaje del motor visto desde la salida de humos.

Para finalizar el ensamblaje ha sido necesario fijar 49 relaciones de posición entre piezas: 31 concéntricas, 11 coincidentes, 4 paralelas, 2 tangentes y una de bloqueo.

En el Anexo B varios dibujos con las medidas del motor y de algunas de las piezas que lo componen.

4.2 Impresión de la maqueta.

La maqueta del motor está compuesta por 61 piezas que se indican en la tabla 4. La duración teórica para imprimir todas ellas es superior a 70 horas, pero en realidad han sido muchas más horas debido a fallos y repeticiones.

PIEZA	NÚMERO
BANCADA	3
ALETAS DE UNIÓN BANCADA	4
TORNILLOS BANCADA	8
CILINDRO	1
TAPAS CILINDRO	2
TORNILLOS CILINDRO BANCADA	4
ENCENDEDORES	2
TUBERIAS AGUA	2
TUBO ENTRADA DE AIRE Y COMBUSTIBLE	1
TUBO DE SALIDA DE GASES DE COMBUSTION	1
BASE GUIAS	1
GUIAS DE CRUCETA	2
CRUCETA	1
PISTON	1
PERNO CRUCETA PISTON	1
EJE DE PISTON	1
TORNILLO GUIAS	1
BIELA	1
SOMBRERETE BIELA	1
TORNILLO BIELA	1
VALVULAS	2
BARRA VALVULAS	2
SOMBRERETE PARA EXCENRICIDADES	2
TORNILLOS EXCENRICIDADES	2
EXCENRICIDADES	2
LENGÜETAS FIJACIÓN EXCENRICIDADES	2
CIGÜEÑAL	1
BASES COJINETES CIGÜEÑAL	2
TORNILLOS BASE CIGÜEÑAL	4
VOLANTE DE INERCIA	1
LENGÜETAS FIJACIÓN VOLANTE INERCIA	2
TOTAL	61

Tabla 4: Listado de piezas impresas.

En los siguientes apartados se pueden ver agrupadas las diferentes piezas.

4.2.1 El cilindro.

El cilindro ha sido la pieza que más tiempo ha necesitado para su impresión, más de 12 horas. Se ha impreso con el cilindro en vertical para disminuir los soportes y acortar la duración.



Figura 52: Impresión del cilindro.

Las tuberías de entrada y salida del agua de refrigeración se han impreso separadas del cilindro. El cilindro va anclado a la bancada con cuatro tornillos.

Las tapas del cilindro se han impreso en la posición que se muestra en la figura 53. Ha sido necesario habilitar soportes para la tapa del pistón para sustentar la corona circular que queda sin apoyos.



Figura 53 Impresión Tapas del Cilindro.

4.2.2 Entradas de aire y gas, y salida de gases de combustión.

En la figura siguiente se muestra a la derecha la entrada de aire y gas y a la izquierda el tubo de salida de los gases de la combustión. En su impresión han sido necesario soportes y una base artificial que luego ha sido recortada debido a la limitada superficie de contacto de las piezas con la placa de la impresora.



Figura 54 Impresión entrada y salida de gases

4.2.3. La biela, el pistón y las guías de cruceta.

En la figura siguiente se muestran la biela, el sombrerete de la biela, el tornillo de la biela, el pistón, la cruceta, el perno de unión de la cruceta con el pistón, el eje del pistón, las guías de cruceta, su base y el tornillo de unión de las guías con la bancada.

La impresión de estas piezas se ha hecho colocando la superficie más extensa en contacto con la base de la impresora. La biela ha necesitado soportes y los tornillos se han impreso apoyados en la cabeza del tornillo y con una base delgada artificial que luego se ha recortado.

El problema más importante que se ha encontrado en la impresión de piezas altas con poca base, por ejemplo el tornillo con la bancada, ha sido que se despegaba la pieza del plato por el movimiento del cabezal de la impresora.

Para evitar este fallo se ha utilizado adhesivo en la placa, se ha bajado la velocidad de impresión de la primera capa y en algunas ocasiones se ha aumentado de forma artificial la base de la pieza que posteriormente se ha recortado.

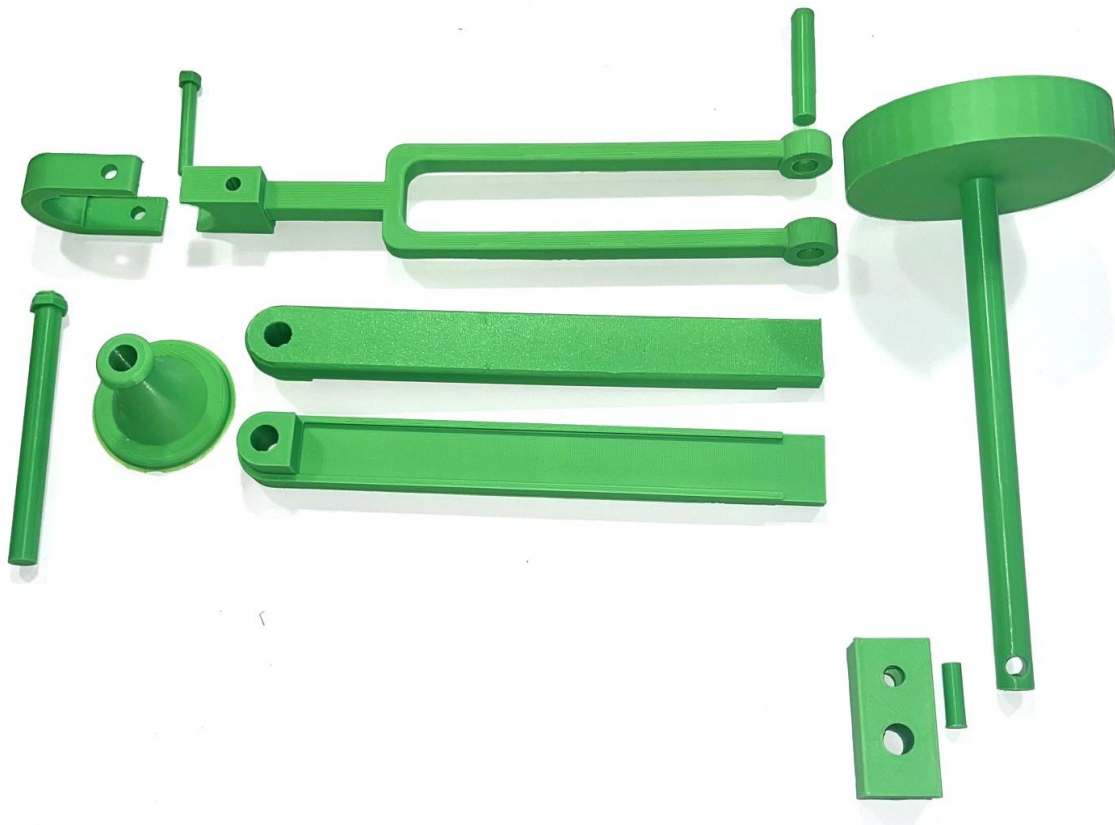


Figura 55 La biela, el pistón, la cruceta y las guías.

4.2.4 El cigüeñal.

En la figura 56 se muestra el cigüeñal y en la figura 57 sus dos soportes y los tornillos de anclaje a la bancada del motor.

El cigüeñal se ha impreso en vertical con el objetivo de que la impresión de los ejes de la biela y de los cojinetes fueran perfectamente cilíndricos y favorecer de esta forma la rotación. Ha sido necesario ponerle soportes para imprimir las paredes que quedaban horizontales sin apoyos.



Figura 56: El cigüeñal.

La base se ha colocado recostada tal como se encuentra una de las dos bases de la figura 57, y los tornillos en vertical con una expansión adicional de la base de la cabeza del tornillo que posteriormente se ha recortado.

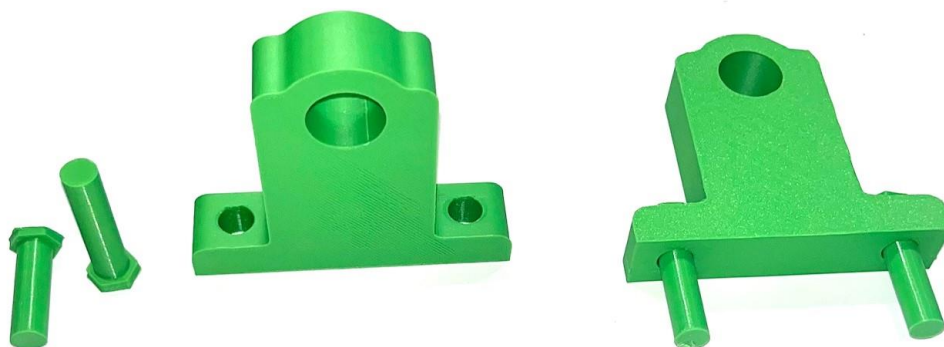


Figura 57: Los cojinetes del cigüeñal

4.2.5 Volante de Inercia.

El volante de inercia es una pieza grande, que ha tardado más de 4 horas para imprimirse. Ha sido construida en la posición que aparece en la figura 59.

También se pueden ver en la figura las dos lengüetas utilizadas para fijar el volante al cigüeñal.



Figura 59: Impresión volante de inercia

4.2.6 Las válvulas de entrada y salida de gases.

En la figura siguiente se muestran las válvulas de entrada y salida, los dos ejes de unión con las barras, las dos barras y los sombreretes de unión con las excentricidades, las dos excentricidades y las lengüetas utilizadas para fijar las excentricidades al cigüeñal.

Las piezas se han impreso apoyadas sobre la placa de la impresora tal como se encuentran en la figura 60.

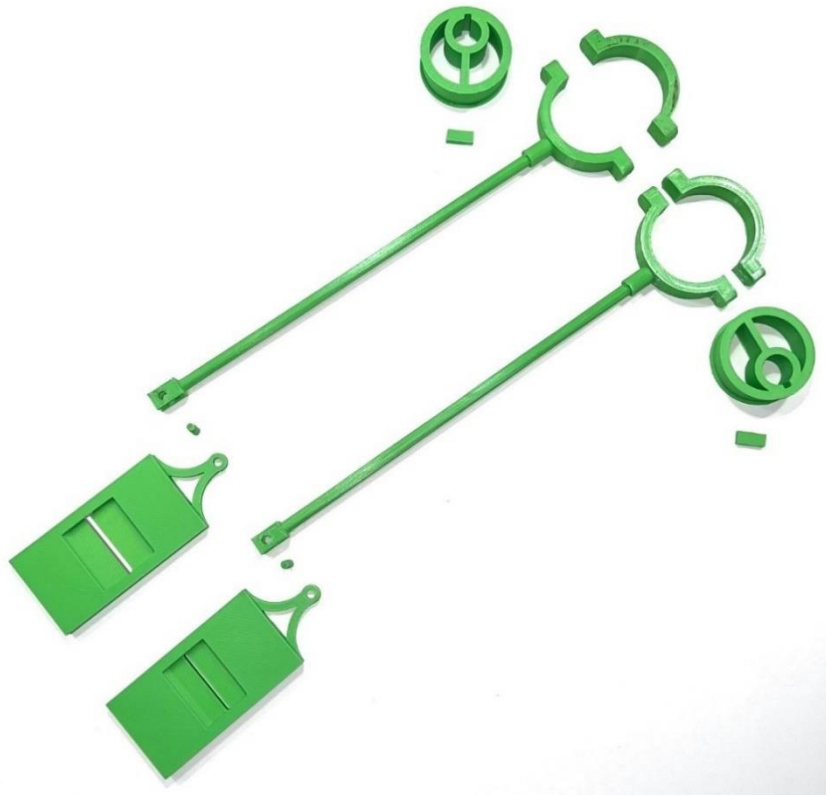


Figura 60: Excentricidades y válvulas de entrada y salida.

4.2.7 La bancada del motor.

La bancada se ha dividido en tres partes para que entrasen en el plato de la impresora. Las tres piezas se enlazan con cuatro aletas atornilladas con 8 tornillos. Adicionalmente se han creado dos rótulos con el nombre del motor.

En la figura 61 se puede ver la bancada montada. Se ha impreso apoyada tal como aparece en la figura, los rótulos apoyados sobre la cara plana y los tornillos apoyados sobre el cabezal.



Figura 61: La bancada del motor

4.2.8 El motor ensamblado.

Antes de montar el motor se han pintado de gris las piezas que en el motor real son de acero: la biela, el cigüeñal, el pistón, las válvulas correderas, los ejes y los tornillos.

Se muestra el motor ensamblado visto desde los dos laterales para no dejar ninguna pieza oculta.

Gracias a los tornillos y a las uniones con lengüetas ha sido posible montar la maqueta rápidamente. Se ha usado las lijas para quitar asperezas en las zonas con movimiento. Los tornillos han encajado de forma ajustada gracias a la holgura de 0,4 mm de reducción de su diámetro.

El motor se mueve fácilmente simulando el desplazamiento de todas las partes móviles.



Figura 62: Motor Ensamblado

5 CONCLUSIONES.

A continuación, se discutirán los resultados obtenidos con los objetivos propuestos al inicio del proyecto.

En el apartado de investigación histórica, se puede considerar que se han cumplido parcialmente los objetivos. Se han obtenido los planos necesarios para poder diseñar y realizar el motor, pero no se ha encontrado ni se conoce de la existencia de planos con medidas sobre diferentes vistas que definan completamente la forma de las piezas. Esto no ha sido un impedimento para la continuación del proyecto, a partir de la medida del diámetro del pistón se ha conseguido sacar el resto de medidas.

Gracias a la obtención de estos planos y a la identificación de todas las partes que forman la máquina, se ha llegado a entender el funcionamiento del motor, punto fundamental para lograr el resto de objetivos.

Respecto a adquirir los conocimientos y destreza en la utilización del software de diseño SolidWorks, se puede concluir que también se ha alcanzado. La curva de aprendizaje ha sido marcadamente exponencial, consiguiendo al final un dominio sólido y un nivel de competencia suficiente para la realización de proyectos complejos. Como se ha mencionado anteriormente en el apartado de Introducción; esto ha sido posible gracias a manuales y videos ilustrativos. Cabe destacar que parte del aprendizaje se ha llevado a cabo durante el propio diseño de las piezas, puesto que durante este proceso se presentaban nuevas formas y geometrías que obligaban a explorar nuevas herramientas y funciones del software. Consecuentemente se puede determinar que también se ha completado el diseño del motor con éxito.

En referencia a la reparación de la impresora del laboratorio de motores térmicos, se puede concluir que se ha realizado. Gracias a los procesos de mantenimiento realizados y al arreglo de las partes problemáticas, la impresora funciona dando resultados más que aceptables. Sin embargo, persisten ciertos fallos de impresión ocasionales relacionados con la adhesión de la primera capa de la cama térmica debido al desgaste de la misma a lo largo del tiempo. Estos inconvenientes son comunes en impresoras con varios años de uso.

Por último, se ha conseguido el objetivo de imprimir todas las piezas y realizar su ensamblaje. Se puede afirmar que esta meta también se ha alcanzado con éxito debido a la gran calidad obtenida en la impresión de las piezas por medio del correcto acondicionamiento de las mismas al quitar y lijar los soportes y las partes con menos calidad. De este modo, la maqueta permite el movimiento esperado de sus partes móviles.

Una vez comparados los resultados con sus objetivos, se puede afirmar que también se ha logrado el objetivo principal de brindar homenaje al inventor del primer motor de combustión interna.

6 IMPACTO DEL PROYECTO.

Este proyecto tiene un impacto ambiental poco significativo; aun así, se ha desarrollado en todo momento con un enfoque claro en la minimización del impacto ambiental. Durante las fases de diseño e impresión de las piezas del motor, se ha intentado reducir al máximo el material sobrante. Mediante la tecnología avanzada de SolidWorks se ha alcanzado un diseño eficiente reduciendo el desperdicio en el proceso de fabricación.

Además, el material utilizado en la impresión, PLA (ácido poliláctico), es un material biopolímero derivado de recursos renovables como el maíz, lo que supone una opción sostenible en comparación con los plásticos originales derivados del petróleo. Una de las grandes ventajas que presenta el PLA, es su capacidad de biodegradación en condiciones de fabricación, lo que permite descomponerse en forma más amigable con el medio ambiente, reduciendo así su impacto en los vertederos.

Sobre aspectos socioeconómicos, el trabajo permite a las nuevas generaciones tanto de ingenieros como de estudiantes, entender y apreciar la evolución de la tecnología en el automovilismo y en la industria.

Cabe remarcar que también se promueve la conservación del patrimonio industrial y la historia de la ingeniería.

7 LÍNEAS FUTURAS.

A partir de este proyecto se abren nuevas vías de trabajo que podrían complementarlo o mejorarlo.

Uno de los proyectos más inmediatos supondría el diseño y fabricación de todo el sistema eléctrico del motor, el cuál ha sido escasamente abordado en este trabajo. Este sistema incluiría la instalación de todos los componentes eléctricos que se encuentran en el motor para asegurar el encendido en el momento adecuado. Entre estos componentes se encuentran el cableado, las bobinas, los interruptores y otros elementos.

Otra línea de trabajo sería incorporar un regulador Watt al motor, también conocido como regulador centrífugo. La función del regulador es controlar y estabilizar la velocidad de rotación del motor. Esta extensión incluiría el diseño y la fabricación del mismo además del estudio necesario para integrarlo en el motor ya fabricado, ajustando el sistema para asegurar el correcto funcionamiento del conjunto.

Otro proyecto futuro más ambicioso, sería la realización de la misma maqueta con acero, material capaz de soportar las condiciones de funcionamiento de un motor real. Con esto se buscaría crear un motor a escala que funcione perfectamente con la utilización de un fluido motor alcanzando la combustión.

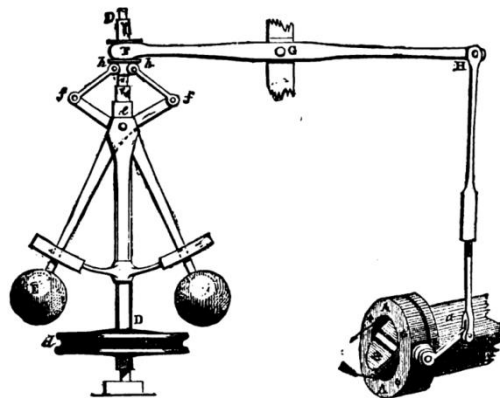


FIG. 4.—Governor and Throttle-Valve.

Figura 63: Regulador Watt

Por supuesto, este proyecto incluiría la fabricación e instalación del sistema eléctrico necesario. Se podría llevar a cabo en el laboratorio de metalurgia de la universidad poniendo en práctica los conocimientos obtenidos en asignaturas como *Fabricación*. Un apartado que se podría abordar sería el estudio de posibles mejoras que llevarían al motor a una mejor eficiencia como la utilización de otros combustibles o algún cambio en el sistema de válvulas.

En conclusión, un listado de posibles trabajos futuros sería:

- Diseño, fabricación e implantación del sistema eléctrico del motor a la maqueta realizada.
- Diseño, fabricación e implantación de un regulador Watt a la maqueta.
- Fabricación de una maqueta funcional del motor de Lenoir con metal.

8 BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Gepeese, "La Revolución Industrial (1760-1840)," Available: https://www.finanzasparatodos.es/gepeese/es/inicio/laEconomiaEn/laHistoria/revolucion_industrial.html.
- [2] T. y. T. Fernandez Elenea, "Bibliografía y Vida Étienne Lenoir ," 2004. Available: <https://www.biografiasyvidas.com/biografia/l/lenoir.htm>.
- [3] Editorial Etecé, "Máquina de vapor ," 2023. Available: <https://concepto.de/maquina-de-vapor/>.
- [4] Mónaco Patents, "The Lenoir Gas Engine ," Available: <https://monaco-patents.com/patents/case-study-the-gasoline-engine/prior-art-of-ottos-four-stroke-engine/the-lenoir-gas-engine.html>.
- [5] Anonymous "Musé des Arts et Métiers," Available: <https://www.arts-et-metiers.net/>.
- [6] Musé des Arts et Metiérs, "Moteur Lenoir, 1860," Available: <https://www.youtube.com/watch?v=gzdWJVqWdro>
- [7] Harald Huppertz, "Modell Lenoir-Motor 1860," Available: <https://www.youtube.com/watch?v=wuuxEY9zZBA>
- [8] SolidWorks. Introducción a SolidWorks.
- [9] Diego Gaona, "Tutorial Curso Básico en Solidworks Principiantes". Available: <https://www.youtube.com/watch?v=dZrup1VqtVI&t=14s>
- [10] Sergio Gomez Gonzales, "El gran libro de SolidWorks" 2008.
- [11] TRONXY, *Instalation Intruction X5SA*.
- [12] Just Vlad, "Tronxy X5SA Pro - 3D Printer - Unbox & Setup,". Available: <https://www.youtube.com/watch?v=UN-2KeuzAKs&t=849s>
- [13] WWWhatsnew, "Anycubic Kobra 2 Pro, la impresora 3D con velocidad de 500 mm/s y compensación de vibración,". Available: <https://www.youtube.com/watch?v=DSLpCqTO5uY>
- [14] Anonymous *UltiMaker S7 &UltiMaker S7 Manual De Instalación Y Uso*.

9 PLANIFICACIÓN Y PRESUPUESTO.

Para facilitar el entendimiento de como se ha realizado la planificación del proyecto se presenta una Estructura de Descomposición de Proyecto (EDP).

En la EDP se pueden observar cuatro grandes bloques que incluyen todo el proceso de investigación, de diseño en SolidWorks, de impresión 3D y del ensamblaje final.

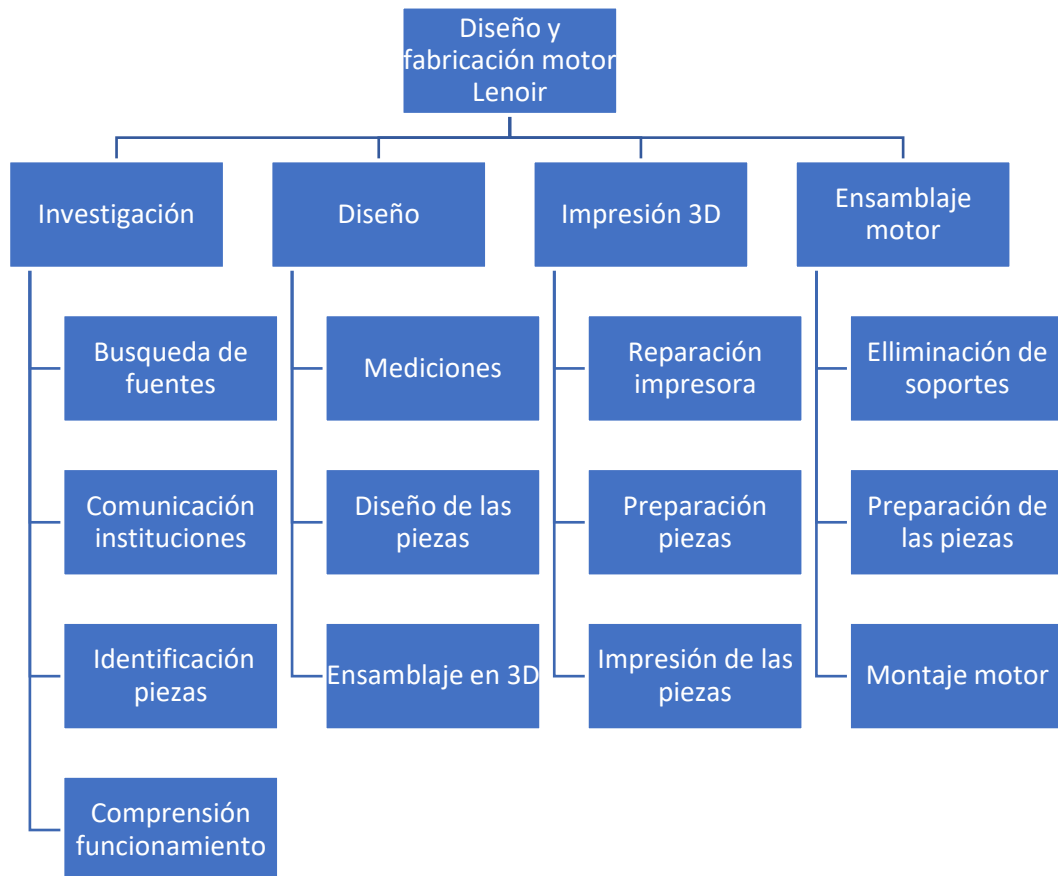


Figura 64: EDP del proyecto

Para la planificación temporal se indican los tiempos que han sido necesarios emplear para cada uno de los cuatro bloques en un diagrama de Gantt.

Como se puede observar en la Figura 65, proyecto comienza el 4 de marzo y finaliza el 30 de octubre de 2024 con una duración total de 130 días laborables.

En el diagrama de Gantt cabe destacar en rojo el camino crítico, ruta formada por las tareas esenciales cuya demora causaría el retraso entero del proyecto.

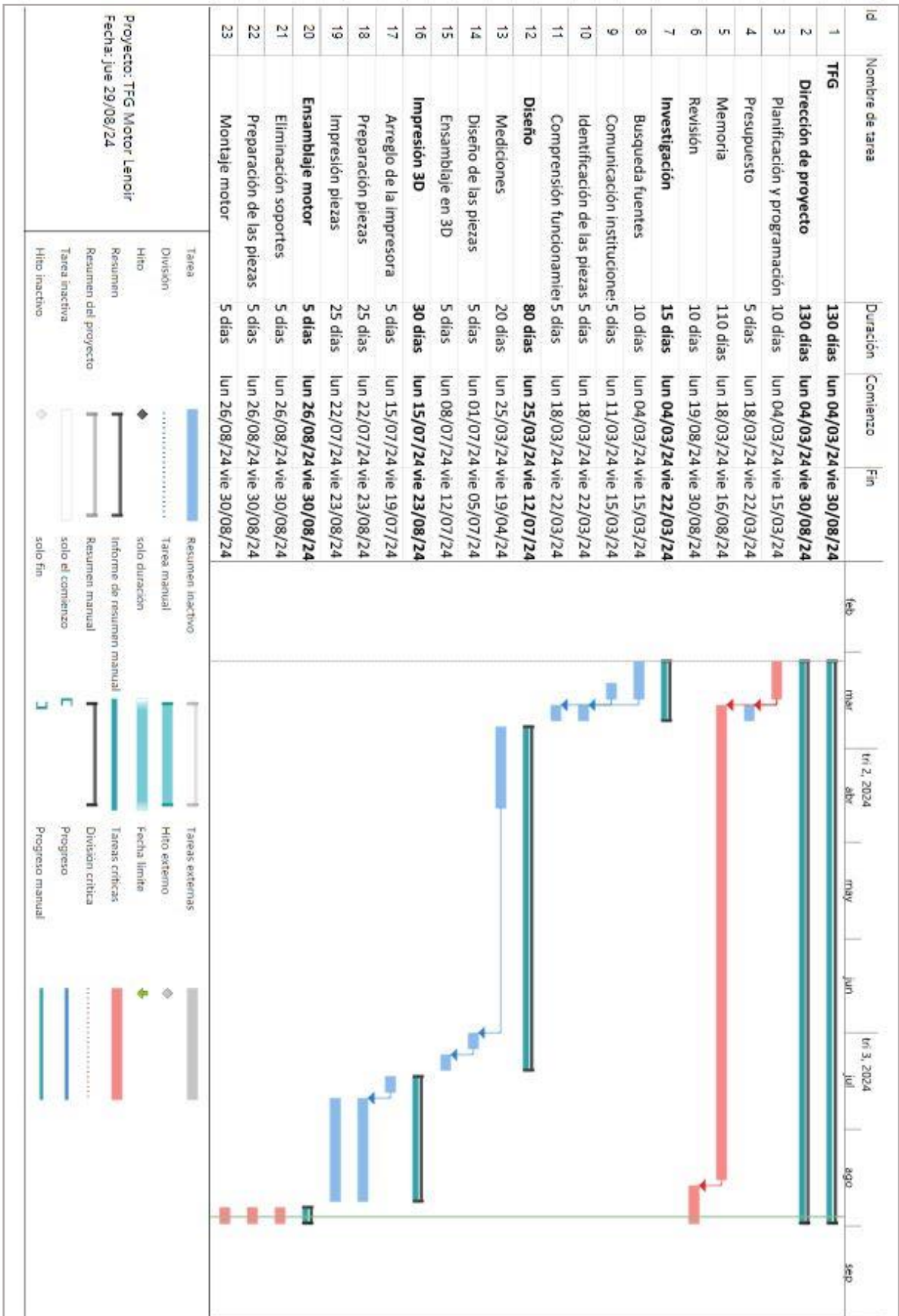


Figura 65: Diagrama de Gantt.

A continuación, se realiza el desglose del presupuesto que ha sido necesario para la realización del proyecto. Se diferencia entre costes directos e indirectos.

Los costes directos están formados por los recursos materiales y los recursos humanos.

En recursos materiales encontramos el equipo y material de impresión 3D, la licencia del software SolidWorks y todas las herramientas utilizadas para completar correctamente el ensamblaje del motor.

En recursos humanos se incluyen las horas invertidas por las personas que han participado en el proyecto por su coste horario.

Finalmente se incluye un 3% de costes indirectos e impuestos.

COSTES DIRECTOS RECURSOS MATERIALES	
Impresión 3D	342€
Impresora 3D	250€
Material de impresión (bobina PLA x4)	80€
Pegamento base impresora	12€
Software (licencia SolidWorks)	750€
Herramientas	27€
Juego de limas	10€
Cutter x2	7€
Pegamento super glue	10€
TOTAL	1.119€

Tabla 5: Costes directos recursos materiales.

COSTES DIRECTOS RECURSOS HUMANOS			
	HORAS	COSTE HORARIO	TOTAL
Alumno	510	16 €	8.160€
Tutor	50	38 €	1.900€
Personal de laboratorio	10	22 €	220€
TOTAL			10.280€

Tabla 6: Costes directos recursos humanos

COSTES TOTALES PROYECTO	
Costes directos recursos materiales	1.119€
Costes directos recursos humanos	10.280€
Costes directos	11.399€
Costes indirectos (3% costes directos)	342€
TOTAL sin IVA	11.741€
IVA	2.466€
TOTAL	14.207€

Tabla 7: Costes totales del proyecto

10 INDICE DE FIGURAS.

Figura 1: Ilustración de época del motor de Lenoir	9
Figura 2: Fábrica del siglo XIX.....	10
Figura 3: Étienne Lenoir	11
Figura 4: Diseño de máquina de vapor de la época.....	12
Figura 5: Patente US 31.722 Motor Lenoir.....	13
Figura 6: Bobina de Rhumkorff	14
Figura 7: Ciclo de Lenoir	15
Figura 8: Dibujo del motor de Lenoir	20
Figura 9: Dibujo automóvil con motor de Lenoir	23
Figura 10: Motor de Lenoir en el “Musée des Arts et Métiers” de Paris.....	24
Figura 11: Esquema del motor de Lenoir.....	25
Figura 12: Logo de SolidWorks	25
Figura 13: Ejemplo de Pieza, Ensamblaje y Dibujo.....	27
Figura 14: Entorno gráfico de SolidWorks	28
Figura 15: PropertyManager de la operación de extrusión	29
Figura 16: Ejemplos de operaciones 3D (I)	32
Figura 17: Ejemplos de operaciones 3D (II)	33
Figura 18: Ejemplos de operaciones 3D (III).....	33
Figura 19: Ejemplo de operaciones 3D (IV)	34
Figura 20: Ejemplo de operaciones 3D (V)	34
Figura 21: Ejemplo de ensamblaje.....	36
Figura 22 Impresora 3D Tronxy.....	36
Figura 23: Esquema del cabezal de la impresora.....	37
Figura 24: Masa de teflón en la base calentadora.....	38
Figura 25: Dual Drive Extruder y conectores neumáticos.....	38
Figura 26: Anillos impresos antes y después de la reparación.....	39
Figura 27: Impresora Anycubic Kobra 2 Pro.....	39
Figura 28: Ejemplo de comandos G-code.....	40
Figura 29: Logo de Cura	41
Figura 30: Ejemplo utilización de Cura	41
Figura 31: Configuración básica de Cura.....	42
Figura 32: Parámetros de configuración en Cura para Tronxy X5SA.....	43
Figura 33: Configuración de parámetros de impresión en Anycubic Kobra 2 Pro.....	44
Figura 34 Prueba de impresión para determinar holguras.....	45
Figura 35: Diseño del cilindro.....	48
Figura 36: Tapas del cilindro.....	48
Figura 37: Entrada de aire y combustible.....	49
Figura 38: Salida de gases de combustión.....	49
Figura 39: El pistón y la cruceta.....	50
Figura 40 Piezas de las guías de cruceta.....	50
Figura 41: Ensamblaje de las guías de cruceta.....	51
Figura 42: La biela.....	52
Figura 43: El cigüeñal y los cojinetes	52
Figura 44: Ángulo de las excentricidades con la biela.....	53

Figura 45: Diseño del volante de inercia.....	54
Figura 46: Diseño del mecanismo de entrada y salida de gases.....	55
Figura 47 Ensamblaje de las válvulas correderas.....	55
Figura 48: Fases del motor.....	56
Figura 49: La bancada del motor.....	57
Figura 50: Ensamblaje del motor visto desde la entrada de combustible.	58
Figura 51: Ensamblaje del motor visto desde la salida de humos.....	59
Figura 52: Impresión del cilindro.....	61
Figura 53 Impresión Tapas del Cilindro.	62
Figura 54 Impresión entada y salida de gases	62
Figura 55 La biela, el pistón, la cruceta y las guías.	63
Figura 56: El cigüeñal.	64
Figura 57: Los cojinetes del cigüeñal.....	64
Figura 58: El cigüeñal	65
Figura 59: Impresión volante de inercia.....	65
Figura 60: Excentricidades y válvulas de entrada y salida.....	66
Figura 61: La bancada del motor.....	67
Figura 62: Motor Ensamblado.....	68
Figura 63: Regulador Watt.....	74
Figura 64: EDP del proyecto	78
Figura 65: Diagrama de Gantt.....	79
Figura 66: Plano del motor de Lenoir	91
Figura 67: Plano del motor de Lenoir del Musée arts et metiers en Paris.....	92
Figura 68: Publicación de 1886 del motor de Lenoir.....	93

11 ÍNDICE TABLAS.

Tabla 1: Operaciones de Croquis	30
Tabla 2: Operaciones tridimensionales	31
Tabla 3: Relaciones de posición en ensamblajes.	35
Tabla 4: Listado de piezas impresas.....	60
Tabla 5: Costes directos recursos materiales.....	80
Tabla 6: Costes directos recursos humanos.....	80
Tabla 7: Costes totales del proyecto.....	80

12 ABREVIATURAS, SÍMBOLOS Y UNIDADES.

Abreviatura o símbolo	Término	Unidades
3D	Tres dimensiones	-
C _p	Calor específico a presión constante	J/KgK
C _v	Calor específico a volumen constante	J/KgK
EDP	Estructura de descomposición del proyecto	-
I	Momento de inercia	Kgm^2
m	Masa de la mezcla	Kg
P	Presión de la mezcla	Pa
PLA	Ácido poliláctico	-
q	Calor específico	J/Kg
STL	Standard Triangle Lenguaje	-
T	Temperatura de la mezcla	K
TFG	Trabajo fin de grado	-
V	Volumen de la mezcla	m^3

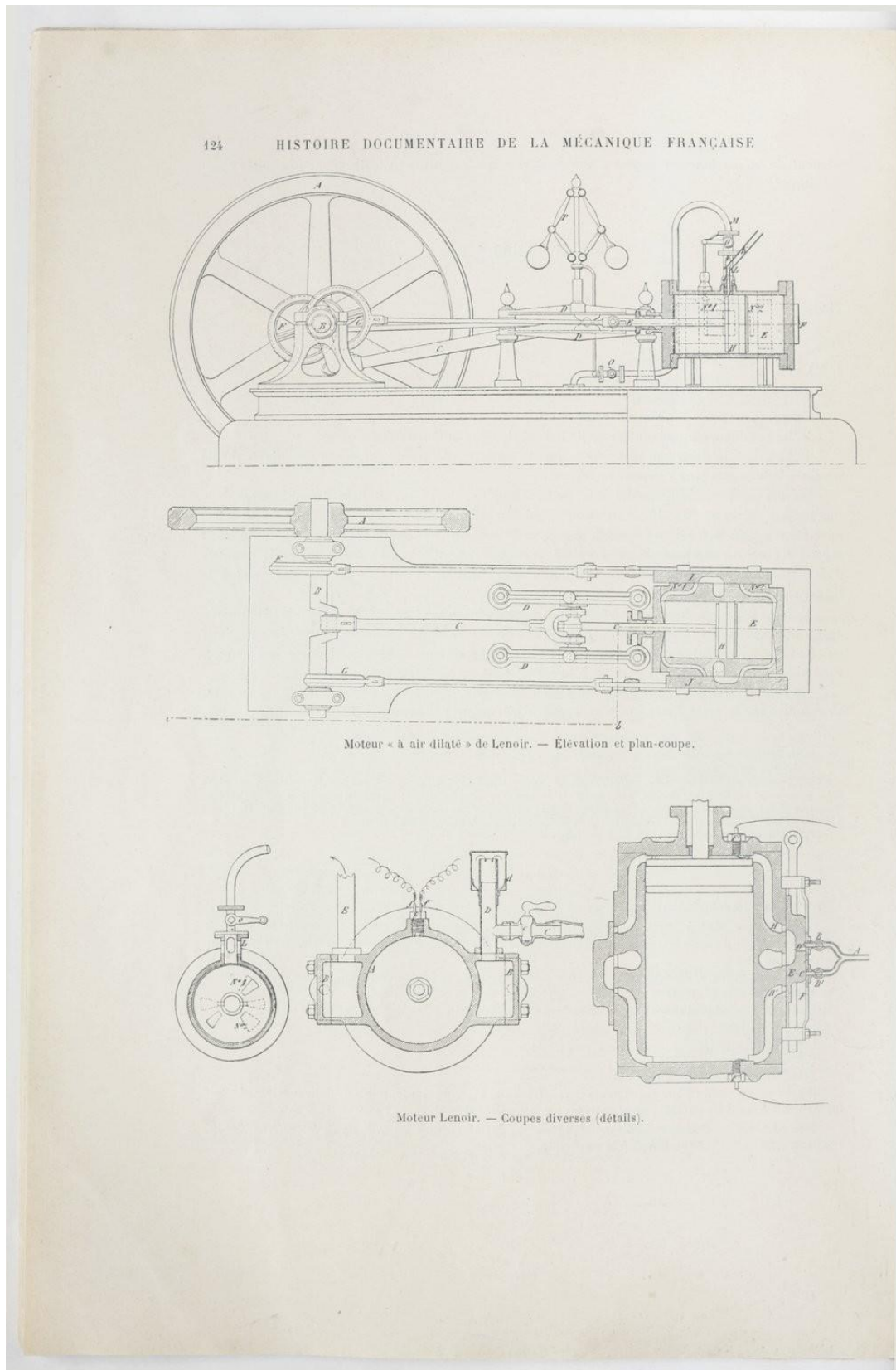
13 GLOSARIO.

Se indican los términos presentes en el documento utilizados en el ámbito del diseño y de la impresión en 3D.

VOCABLO	SIGNIFICADO
3MF	Formato de fichero 3D desarrollado por un consorcio de empresas líderes en impresión 3D.
BRIM	Borde adicional que se imprime alrededor del perímetro de la base de una pieza 3D.
EXTRUDER	Dispositivo en impresoras 3D que funde el filamento y lo deposita para formar el objeto tridimensional.
EXTRUSIÓN	Proceso de expansión en la tercera dimensión de una forma plana para generar un objeto 3D.
G-CODE	Lenguaje de programación utilizado en las impresoras 3D.
OBJ	Formato de fichero que describe la geometría de un modelo 3D.
RAFT	Capa horizontal que se imprime para nivelar el plato de la impresora 3D.
SLICER	Software que divide en capas un objeto en 3D y genera un fichero con comandos que pueden interpretar las impresoras 3D.
STL	Formato de fichero que representa un objeto 3D como una colección de triángulos.

14 ANEXOS.

14.1 Planos y documentos del motor de Lenoir.



Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France

Figura 66: Plano del motor de Lenoir

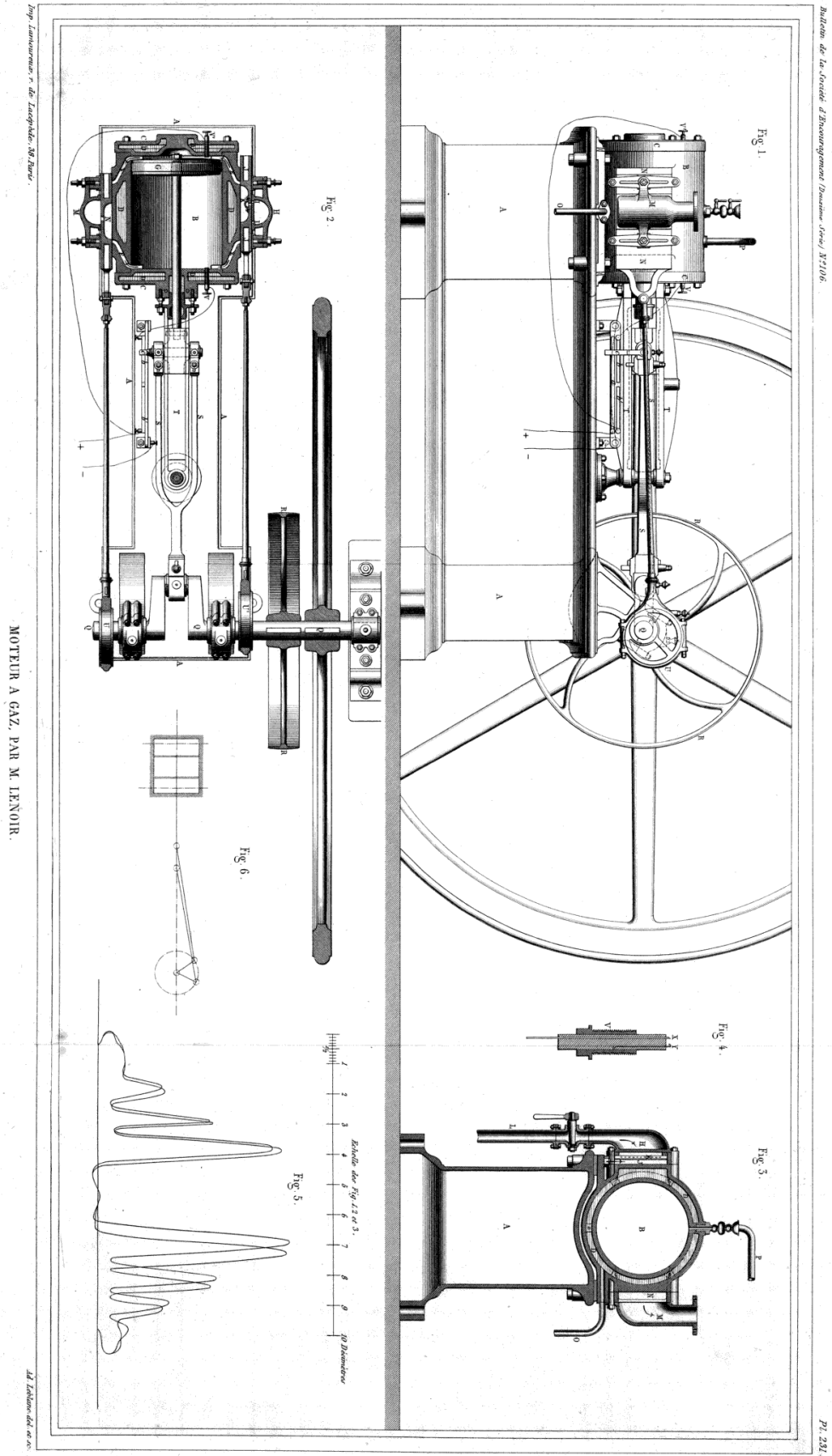


Figura 67: Plano del motor de Lenoir del Musée des Arts et Métiers en Paris

mélange de 95 parties d'air pour 5 de gaz d'éclairage, ce qui développe sur le piston une pression de 5 atmosphères. Il ne nécessite pas l'emploi de l'eau et le piston ne se graisse pas, non plus que le tiroir, de sorte qu'il ne s'encrasse pas, et peut marcher nuit et jour, sans interruption ni surveillance. L'allumage se fait au bec de

gaz permanent. Outre ce petit moteur domestique, MM. Rouart frères construisent également et exposent au *Concours général agricole de Paris* le nouveau moteur à gaz LENOIR qui constitue aujourd'hui l'appareil le plus perfectionné de ce genre. Les moteurs peuvent fonctionner sans eau, jusqu'à deux chevaux. La chambre d'explosion et le cylindre sont munis d'ailettes pour la diffusion du calorique de l'explosion. Le tiroir, qui constitue l'organe le plus délicat des moteurs à gaz en général, est supprimé, et l'allumage se fait au moyen de l'électricité. La bobine et les fils sont emmagasinés dans le socle, livrés avec chaque moteur. Le même moteur peut aussi être alimenté au moyen d'air carburé produit au moyen d'un carburateur spécial accolé au moteur et entraîné par ce dernier.

Le tout, moteur de deux chevaux et carburateur, forme un ensemble qui peut être réuni et arrimé sur un chariot solide à deux roues, facilement transportable. Ce moteur automobile a été dénommé par les constructeurs, moteur agricole : il peut en effet rendre les plus grands services à la ferme et dans les exploitations culturales en général.

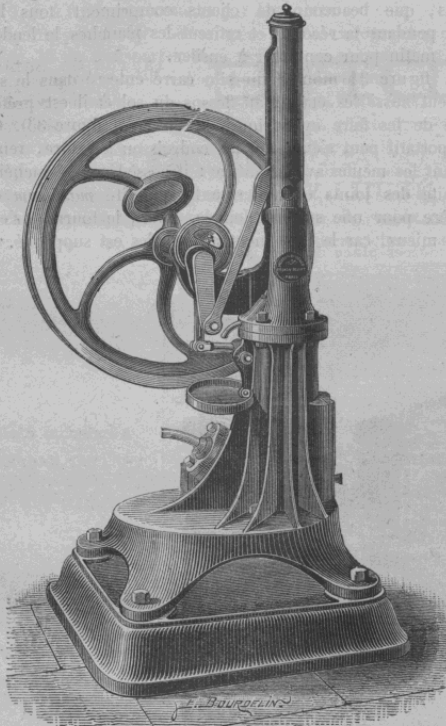


Figure 36. — Moteur Bishop.

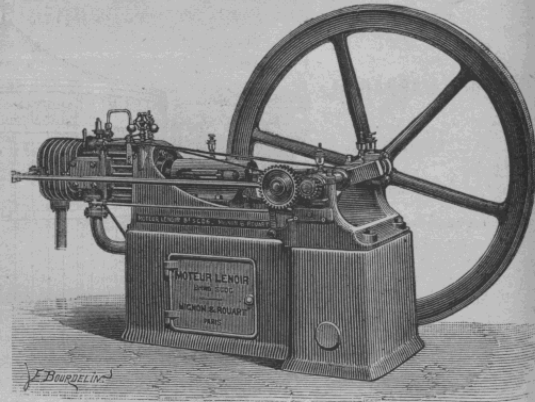
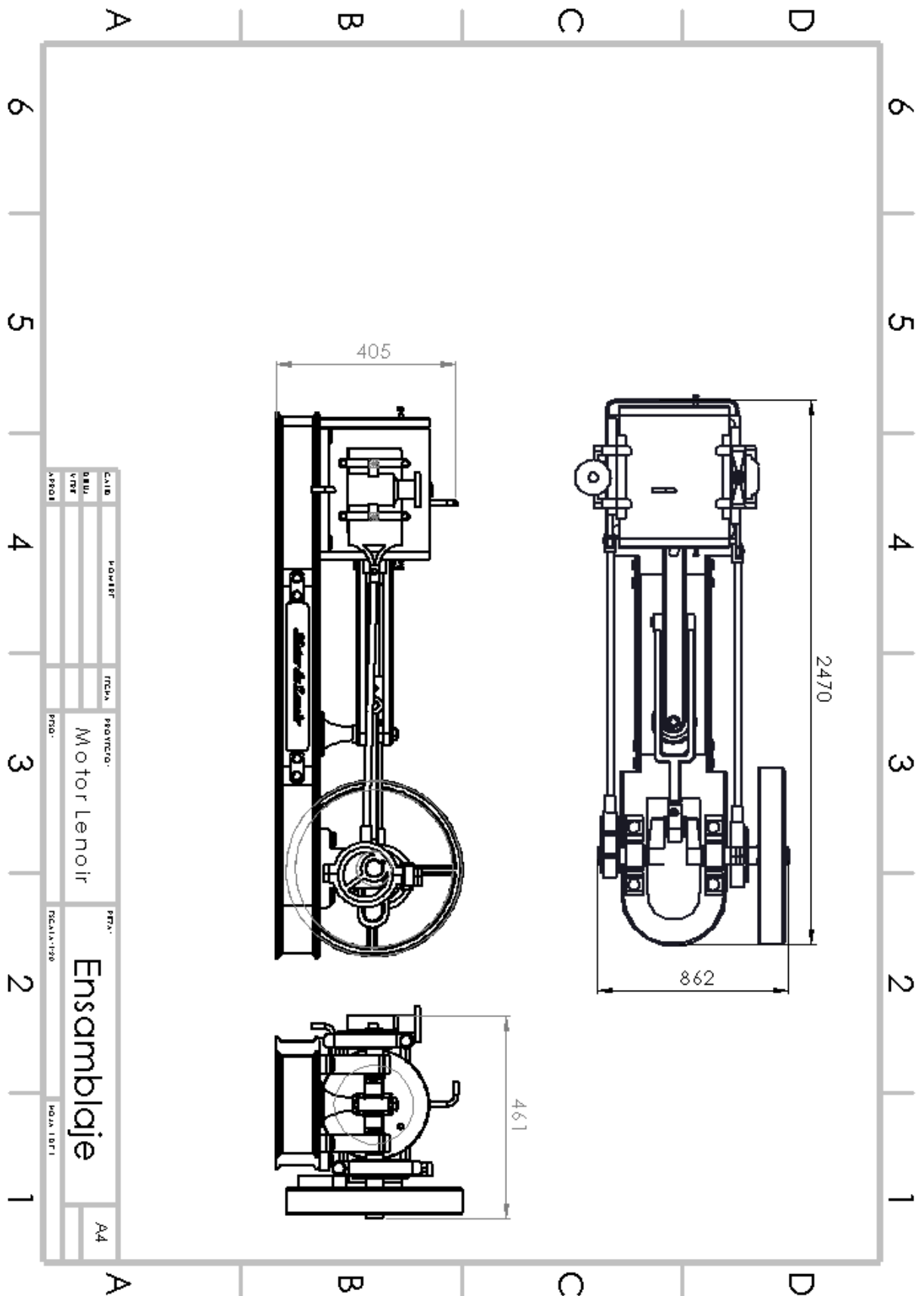
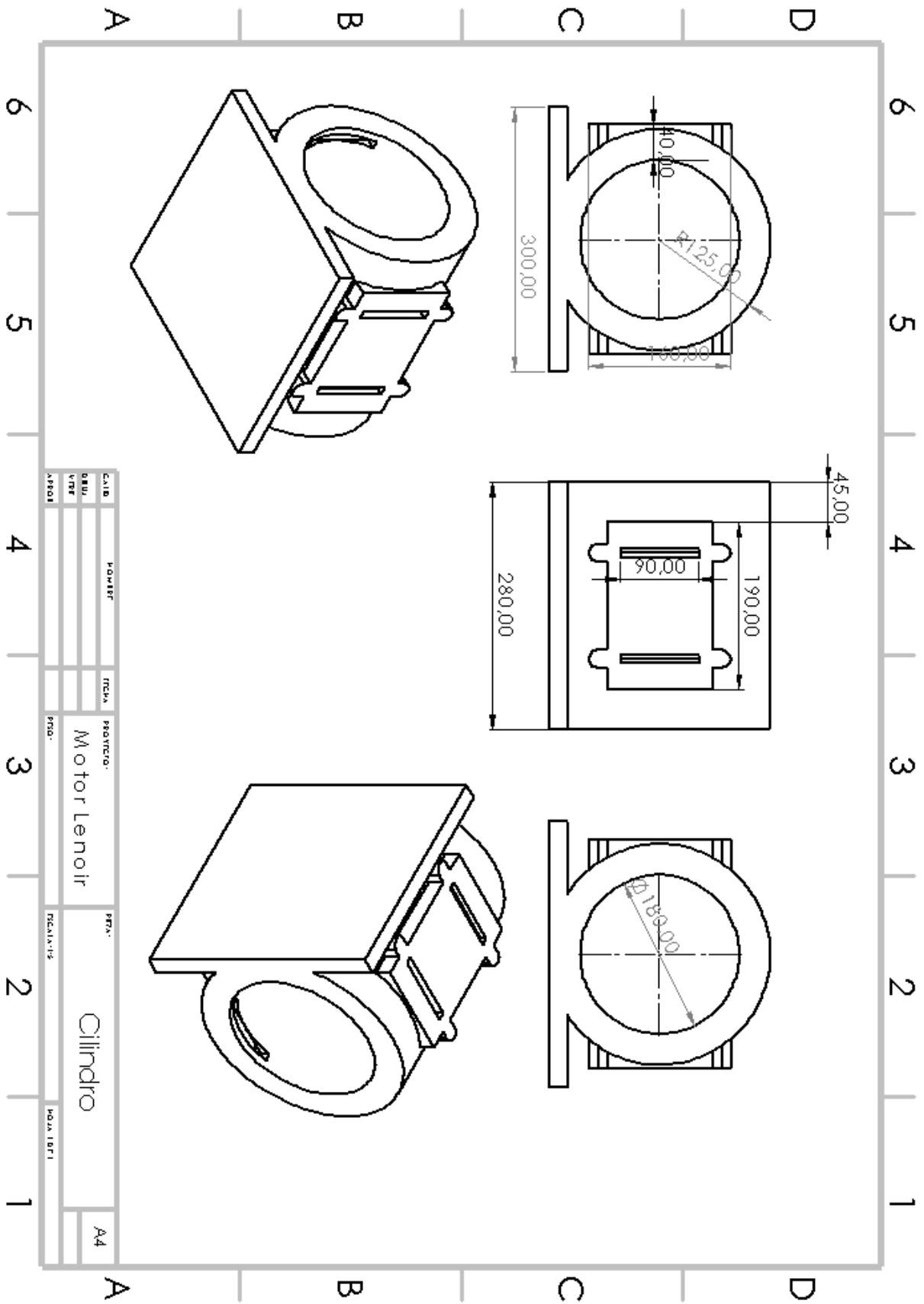


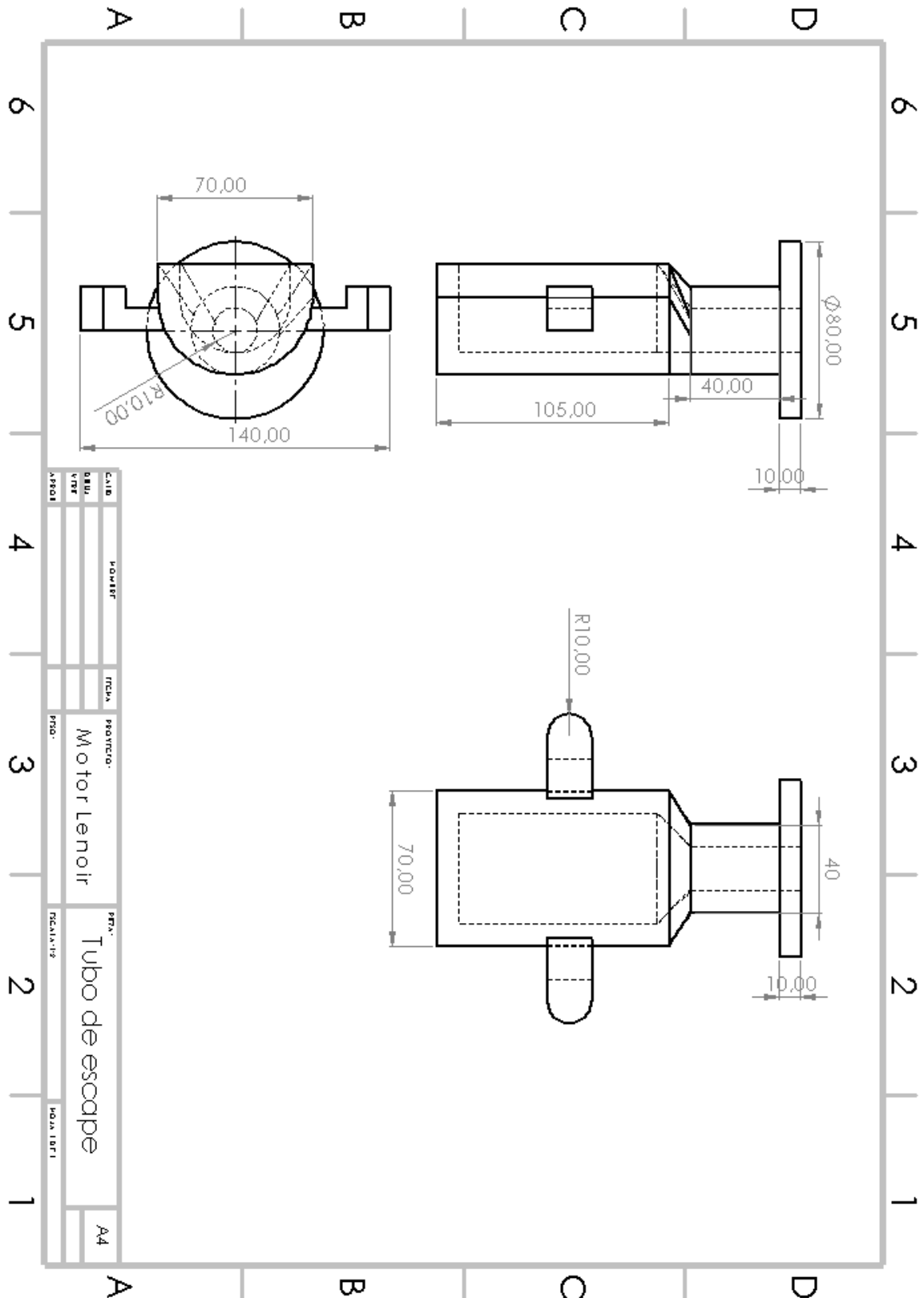
Figure 37. — Moteur Lenoir.

Figura 68: Publicación de 1886 sobre el motor de Lenoir.

14.2 Dibujos del motor y de piezas a diferentes escalas





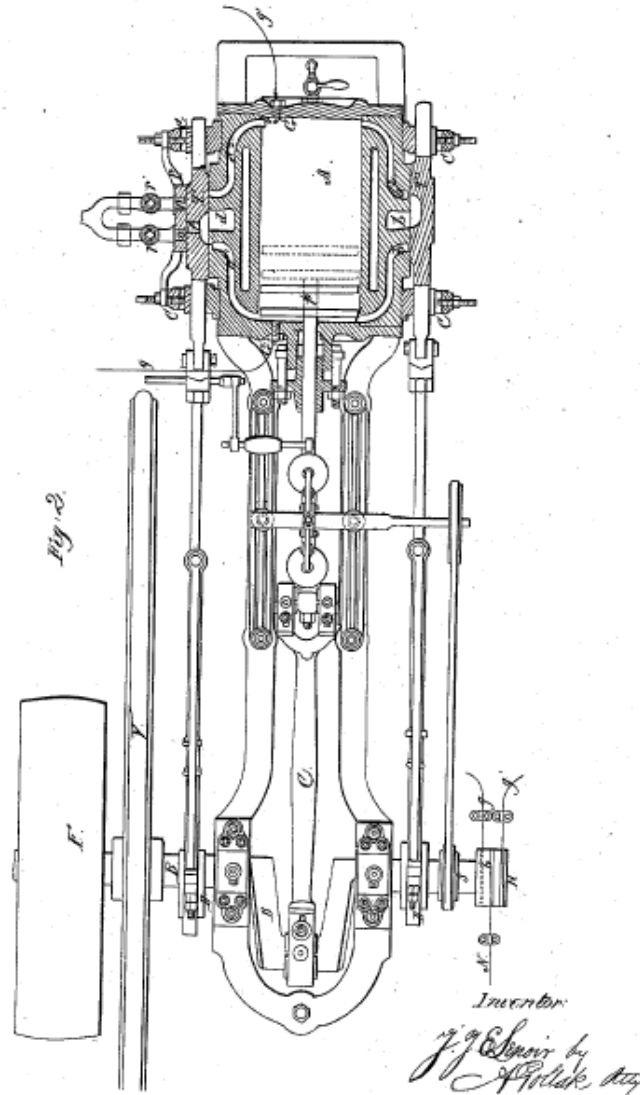


3 Sheets—Sheet 2.

J. J. E. LENOIR.
AIR ENGINE.

No. 31,722.

Patented Mar. 19, 1861.



J. J. E. LENOIR.
AIR ENGINE.

3 Sheets—Sheet 3.

No. 31,722.

Patented Mar. 19, 1861.

Fig. 3

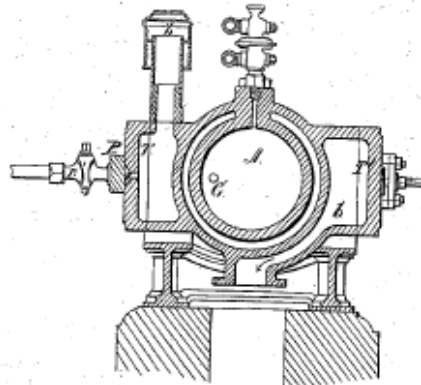
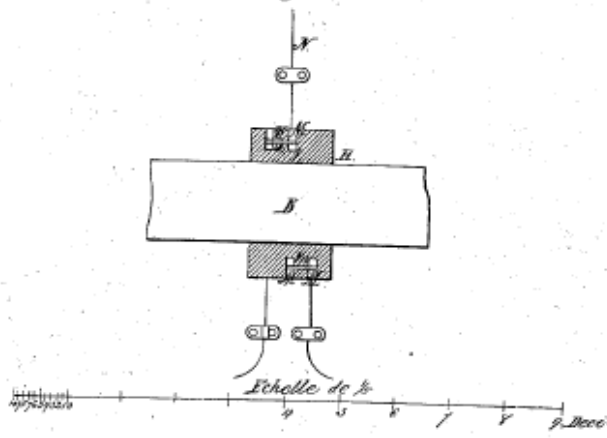


Fig. 4



Witnesses:
L. M. Lenoir
H. P. Lenoir

Inventor:
J. J. E. Lenoir by
A. P. Lenoir his atty

UNITED STATES PATENT OFFICE.

JEAN JOSEPH ETIENNE LENOIR, OF PARIS, FRANCE.

IMPROVED AIR-ENGINE.

Specification forming part of Letters Patent No. 31,722, dated March 19, 1861.

To all whom it may concern:

Be it known that I, JEAN JOSEPH ETIENNE LENOIR, of Paris, in the Empire of France, have invented a new and useful Improvement in Hot-Air Engines; and I hereby declare that the following is a full, clear, and exact description of the same, reference being had to the accompanying drawings, which form part of this specification.

This my invention relates to engines, whether stationary or locomotive, in which the motive power is air dilated or expanded or heated by the combustion of an inflammable gas; and it consists in or is based upon two fundamental principles which constitute the characteristic features of my discovery or invention, viz., first, the application of the combination or mixture with atmospheric air of lighting-gas or any other inflammable gas; second, the simultaneous action of both in a machine or engine deriving its elements of function from electricity and operating substantially in the manner of the ordinary steam-engine. From these statements it will appear that although I employ gas and air in the proportions of about eighty-five per cent. of the latter to fifteen per cent. (which, by the way, is a maximum) of the former, this my engine cannot be classed among gas-engines. Indeed, the functions of the gas I employ do not consist in detonating or exploding it, thereby impelling the piston, as this has heretofore been done or suggested, but in the use of the gas as a fuel that can be instantaneously and regularly ignited, and without producing any shock, for the purpose of heating the air that is mixed with it. The air thus dilated or expanded will act on the piston in the same manner as steam would in ordinary steam-engines.

The cylinder, according to my invention, is made to act alternately as the generator of the motive power and as the recipient thereof, the elastic fluid acting with high pressure and expansively, according to the length of the cylinder. The products or residue of the combustion escape at regular intervals at each stroke of the piston, so that when in operation the engine has the appearance of a steam-engine, while in reality it is an engine working with dilated or hot air.

Engines constructed and operating according to my invention are easily regulated by applying the means of regulation or of adjust-

ment upon either of the three component elements—*i. e.*, either upon the admission of air, or upon the flow of gas, or upon the apparatus generating electricity.

Instead of lighting-gas, the liquid hydrocarbons may be used by reducing the same into vapor, also pure hydrogen gas, sulphurous gas, the inflammable vapors or gases produced by the heating of the essence of boghead, gazine tar, or other hydrocarbon, or of the mixture of said substances.

To enable others to make and use this my invention, I shall now proceed to describe in detail an engine constructed according to the principles of my invention.

Figure 1 represents a longitudinal elevation of the engine complete; Fig. 2, a plan view of the same, the cylinder being shown in section. Fig. 3 shows a transverse section of the cylinder.

Upon examination of the figures it will be perceived that this engine is similar or identical with the ordinary steam-engine, and being composed of the same parts it is susceptible of the many modifications of which ordinary steam-engines are.

The cylinder A is cast with a casing, and is arranged so as to have two valve-seats, upon which two separate slide-valves, T and T', have their play. These valves alternately open at suitable intervals the nozzles *a a'*, that conduct the air and gas toward each side of the piston, while the nozzles *b b'*, acting in a similar manner, serve the purpose of exhaust or emission of the products of combustion. The slide-valve T serves for the introduction of the mixture of air and gas, and is provided with an orifice, *t*, communicating with either of the apertures *o o'* in the plate P. This plate is armed with two cocks, *v v'*, admitting of the passage of gas. The introduction of atmospheric air takes place through the orifice *a*, communicating with the tube *t'*, surmounted by a cap, *b*. The slide-valves work entirely uncovered—*i. e.*, without a distributing-chest—and they are guided by brackets *c*, bolted to the cylinder. The arrangement of these brackets is such as to allow of perfect adjustment of the surfaces, respectively, of the slide-valves and the valve-seat by means of a regulating-screw.

The cap *b* acts in some measure like a gasometer—*i. e.*, it holds the gas that would have

a tendency to escape. The movement of the piston *p* is transmitted to the main driving-shaft *B* by means of a connecting-rod, *c*, attached to the crank of the shaft. The two eccentrics *D* and *D'* operate the slide-valves *T* and *T'*, and a small pulley, *E*, imparts movement to a governor on the fly-wheel *V*. A large pulley, *F*, transmits the power, and suitable gearing mechanism complete the machinery appertaining to the engine proper.

The cylinder is provided at both of its extremities with the igniting apparatus *G G'*, which communicates with a suitable distributor of electricity, *H*, placed upon the main shaft. The distributor is connected with a Rhunkorff apparatus that is supplied from a battery or other source of electricity.

Having thus described the details of machinery I use, I shall now proceed to describe the *modus operandi*. I start the machinery or engine by giving motion to the piston *p*, thereby producing a vacuum behind the piston, which causes the air and gas to penetrate through the nozzles *a a'*; but inasmuch as the slide-valve *T* opens the orifice *a* before the apparatus is placed in communication with either of the openings *o o'*, through which the gas is introduced, it is evident that a column of air shall have penetrated the cylinder. At this moment the valve *T* opens the orifices *o o'* in the plate *P*, and gas as well as air will enter the cylinder, without, however, completely mixing with each other, but forming, as it were, veins or layers of both. The valve then closes the orifices of the cylinder, and the apparatus *G*, suddenly emitting its electrical spark, ignites the gas, heats the air and its combinations, and dilates it or them to produce the requisite pressure. The products of combustion will then escape through the channel *b'* by the play of the valve *T'*. The fly-wheel is now in condition to aid the piston in its return movement while the slide-valves *T* and *T'* are shifted. Air and gas are thus introduced at the opposite end of the cylinder, and will be ignited by the second spark from the other apparatus, *G'*, in the same manner as above described.

My object in introducing a column of air before admitting gas and air is to avoid intimate mixture, as it may happen that the carbonic-acid gas produced by the combustion of the first portion of the gas would prevent the remaining portion of the gas from being perfectly consumed. Gas not consumed can render no useful effect, whereas by allowing a column of air to penetrate in advance of the mixture will insure perfect combustion. As the engine works at a very high temperature, I introduce within the casing water, the quantity of which may be regulated by means of the cock *l*, and heat it or convert it into steam and convey it through pipe *l'* to any place I have use for it.

The electricity I derive from an apparatus shown in Fig. 4, consisting of a sleeve of hard rubber or gutta-percha or other non-conductor, *L*, in which are embedded metallic segments *M M'*. The segment *M* is put in constant communication with the conductor of electricity *N*, and the segment *M* with the distributing-wire *g g'*, that are secured to the igniting apparatus *G G'*. The small metallic bars *m m'* unite in contact the distributor with the conductor. The cylinder carries one of the poles. It is therefore easy to watch the operation of the distributor.

In the opening allegation of this specification I have stated that I may use the liquid hydrocarbons as the caloric employed to heat and dilate the air and its combinations. To do this I proceed as follows: I place the substance from which I desire to obtain its gas or vapor in a boiler, in the bottom of which I arrange a jacket or worm, either of which I connect with the exhaust-pipe of the engine. I thus heat the boiler, and as soon as inflammable vapors are produced I receive them in the cylinder. These vapors or gas act in the same manner as lighting-gas, having for effect the heating and dilating of the atmospheric air. I would observe that I reserve to myself the right to introduce atmospheric air alone at that part of the cylinder where pressure is to be exerted, and gas alone where it is to be ignited.

I would mention, in conclusion, that this my invention is applicable, with but slight modification, to all kinds or systems of engines in which steam has heretofore been used; also, that it may be applied to coupler-engines with two or three cylinders, to boats, locomotives, traction and portable engines, &c.; also vertical, horizontal, or inclined cylinders.

Having thus fully described my invention, I claim—

The arrangement in an engine substantially as described, of the parts for the admission to the cylinder successively of air and inflammable vapor or gas in such requisite quantities and proportions as that the former shall act upon the piston by expansion on being heated by the ignition of the latter, as described, in combination with a device for igniting said vapor or gas by electricity at each end of the cylinder, substantially as herein set forth.

In testimony whereof I have signed my name to this specification before two subscribing witnesses.

ET. LENOIR.

Witnesses:

S. MICHAUD,
GEO. HUTTON.