

Trabajo Fin de Máster

Máster en Ingeniería Industrial

Modelado, recreación virtual y análisis por elementos finitos de un motor Stirling en SolidWorks

Autor: Jesús Prian Baena

Tutor: María Gloria del Río Cidoncha

Dep. Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería Industrial

Modelado, recreación virtual y análisis por elementos finitos de un motor Stirling en SolidWorks

Autor:

Jesús Prián Baena

Tutor:

María Gloria del Río Cidoncha

Profesor titular

Dep. Ingeniería Gráfica

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021

Proyecto Fin de Carrera: Modelado, recreación virtual y análisis por elementos finitos de un motor Stirling en SolidWorks

Autor: Jesús Prian Baena

Tutor: María Gloria del Rio Cidoncha

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2021

El Secretario del Tribunal

*A mis padres, a mis amigos y por
supuesto, a Satoshi Nakamoto.
Muchas gracias a todos.*

Resumen

En este trabajo se realizará un modelado en SolidWorks de un motor Stirling tipo beta. Se mostrará el proceso de modelado de todas las piezas que componen su conjunto con una recreación virtual de su cinemática. Además, se hará un estudio termodinámico por elementos finitos.

En este documento se explicará el funcionamiento de este motor y se hará una comparación con la maquina de Carnot.

Asimismo, se hará un breve repaso histórico desde los inicios de la revolución industrial hasta nuestros días y la importancia que supuso el motor Stirling como avance en los primeros motores.

Finalmente, se incluirá en un apartado la impresión en 3D de dicho modelo, haciendo incapié en los métodos más utilizados en la fabricación aditiva, los materiales más usados y las características más importantes usadas en esta nueva tecnología de fabricación.

In this final thesis, a SolidWorks modeling of a beta-type Stirling engine will be carried out. The modeling process of all the pieces that make up its set will be shown with a virtual recreation of its kinematics. In addition, a finite element thermodynamic study will be carried out.

In this document the operation of this engine will be explained and a comparison will be made with Carnot's machine.

Likewise, there will be a brief historical review from the beginning of the industrial revolution to the present day and the importance of the Stirling engine as an advance in the first engines.

Finally, a section will include the 3D printing of said model, emphasizing the methods most used in additive manufacturing, the most used materials and the most important characteristics used in this new manufacturing technology.

Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xiii
Índice de Figuras	xv
Notación	i
1 Introducción	1
1.1 Propósito y objetivos	1
1.2 Diseño y fabricación asistidos por ordenador (CAD - CAM)	1
1.3 Estructura	2
2 Estado del arte	3
2.1 La máquina de vapor	3
2.2 El motor Stirling	8
2.3 El futuro del motor Stirling	9
3 Proceso de modelado en SolidWorks	11
3.1 Metodología empleada	12
3.2 Conjunto Base del motor	14
3.3 Conjunto de piezas móviles del motor	21
3.4 Tornillería	32
4 Emsamblaje del motor	37
5 Funcionamiento del motor	45
5.1 Rendimiento del ciclo de Stirling	48
6 Recreación virtual del motor	49
7 Análisis térmico por elementos finitos	55
7.1 Aplicación de las condiciones de contorno al sistema	57
7.2 Elección del coeficiente de película h	58
7.3 Resultados de la simulación térmica	61
8 Impresión en 3D del motor	63
8.1 Qué es la fabricación aditiva	63
8.2 Historia de la fabricación aditiva	64
8.3 Procesos de fabricación aditiva	65
8.4 Impresora utilizada en el Proyecto	69
8.5 Software CURA	71
8.6 Materiales	73
8.7 Consideraciones tomadas en cuenta	78
8.7.1 Posición	78
8.7.2 Acabados	79
8.7.3 Relleno	80
8.8 Resultado final	81
9 Conclusiones y proyectos futuros	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Diseño en SolidWorks de un manillar de bicicleta [3]	2
Figura 2-1. Primera máquina de vapor, llamada eolípila [5]	3
Figura 2-2. La máquina de vapor de Thomas Savery [8]	4
Figura 2-3. Máquina de vapor de Thomas Newcomen [10]	5
Figura 2-4. Máquina de vapor de James Watt [11]	6
Figura 2-5. Ilustración de la solicitud de patente de Robert Stirling en 1816 [17]	8
Figura 2-6. Recolector solar del proyecto Maricopa Solar [21]	10
Figura 3-1. Numeración de todas las piezas del conjunto [23]	11
Figura 3-2. Análisis por elementos finitos en SolidWorks [24]	12
Figura 3-3. Subconjunto Base del motor	14
Figura 3-4. Base del motor.	14
Figura 3-5. Herramienta <i>sketch</i> para la base del motor.	15
Figura 3-6. Isométrico de la pieza soporte del cigüeñal	15
Figura 3-7. Operación <i>Boss-Extrude</i> en la pieza.	16
Figura 3-8. Operación <i>Hole</i> en la pieza	16
Figura 3-9. Operación <i>Mirror</i>	17
Figura 3-10. Operación <i>Cut-Extrude</i> .	17
Figura 3-11. Operación <i>Circular Pattern</i> .	18
Figura 3-12. Operación <i>Revolve</i> .	18
Figura 3-13. Modelado del cilindro de calentamiento	19
Figura 3-14. Modelado de la junta de goma	19
Figura 3-15. Modelado del depósito de aceite	20
Figura 3-16. Operación de <i>Revolve</i>	20
Figura 3-17. Operación <i>Hole</i>	21
Figura 3-18. Conjunto de piezas móviles del motor	21
Figura 3-19. Operación <i>Revolve</i> .	22
Figura 3-20. Operación <i>Cut-Extrude</i> .	22
Figura 3-21. Modelado del engranaje de transmisión.	23
Figura 3-22. Trazados del perfil. Odontografo de Grant [27].	24
Figura 3-23. Trazado del perfil de acuerdo al Odontografo de Grant [27].	24
Figura 3-24. Trazado en SolidWorks de acuerdo al Odontografo de Grant.	25
Figura 3-25. Herramienta <i>Cut-Extrude</i> para modelar el espacio entre dientes.	25
Figura 3-26. Perfil del engranaje de acuerdo al Odontógrafo de Grant.	26
Figura 3-27. Modelado del pistón	26
Figura 3-28. Operación <i>Chamfer</i>	27
Figura 3-29. Operación <i>Hole Wizard</i> .	27

Figura 3-30. Modelado de la varilla.	28
Figura 3-31. Operación de <i>Cosmetic-Thread</i>	28
Figura 3-32. Modelado de la brida de rodamiento	29
Figura 3-33. Modelado de la pieza cigüeñal	29
Figura 3-34. Modelado de la pieza contrapeso.	30
Figura 3-35. Pieza biela en el conjunto.	30
Figura 3-36. Operación <i>Boss-Extrude</i>	31
Figura 3-37. Operación <i>Fillet</i> .	31
Figura 3-38. Modelado de un rodamiento de bolas	32
Figura 3-39. Operación <i>Revolve</i>	33
Figura 3-40. Operación <i>Revolved -cut</i>	33
Figura 3-41. Operación <i>Cut-extrude</i>	34
Figura 3-42. Operación <i>Boss-Extrude</i>	34
Figura 3-43. Operación <i>Boss-Extrude</i>	35
Figura 4-1. Subconjunto <i>Base del motor</i> .	37
Figura 4-2. Subconjunto <i>Piezas Móviles</i> del motor Stirling	38
Figura 4-3. Relación geométrica <i>Concentric</i> entre dos circunferencias.	38
Figura 4-4. Relación geométrica <i>Coincident</i> entre dos superficies	39
Figura 4-5. Isométrico del conjunto Motor Stirling.	39
Figura 4-6. Vista dimétrica del conjunto.	40
Figura 4-7. Segundo isométrico del Motor Stirling.	40
Figura 4-8. Vista de perfil y alzado del conjunto.	41
Figura 4-9. Vista de perfil del conjunto en SolidWorks.	41
Figura 4-10. Vista de alzado del conjunto en SolidWorks.	42
Figura 4-11. Vista de planta del conjunto en SolidWorks	42
Figura 5-1. Ciclo termodinámico del motor Stirling [29]	45
Figura 5-2. Representación de la fase de aumento de calor y presión en el cilindro (4-1).	46
Figura 5-3. Expansión del gas a temperatura constante (1-2).	46
Figura 5-4. Disipación del calor en el segundo cilindro y disminución de la presión (2-3)	47
Figura 5-5. Aumento de la presión y disminución del volumen (3-4)	47
Figura 6-1. Herramienta SolidWorks Motion para el análisis cinemático del conjunt	49
Figura 6-2. Elección del motor o rotor para la simulación cinemática.	50
Figura 6-3. Desplazamiento lineal del motor Stirling en el instante 1,18 s.	51
Figura 6-4. Velocidad lineal del motor Stirling en el instante 1.18 s.	52
Figura 6-5. Aceleración lineal del motor Stirling en el instante 1.18 s.	53
Figura 7-1. Cálculo de las fuerzas ejercidas en un coche por FEM [32]	55
Figura 7-2. Conjunto que será simulado en SolidWorks	57
Figura 7-3. Condiciones de contorno de temperatura para el análisis térmico.	57
Figura 7-4. Correlaciones para la convección libre en un sólido [36].	58

Figura 7-5. Condiciones de contorno de convección para todas las caras expuestas.	60
Figura 7-6. Malla utilizada para simular el problema de elementos finitos.	60
Figura 7-7. Resultados de la simulación térmica con $h = 6,67\text{Wm}^2\text{K}$	61
Figura 7-8. Resultados de la simulación térmica con $h = 67,1\text{Wm}^2\text{K}$	61
Figura 8-1. Impresión en 3D de un motor de combustión interna [38]	63
Figura 8-2. Línea de tiempo de los avances en la impresión 3D [41]	64
Figura 8-3. Tecnología Powder Bed Fusion (PBF) [43]	65
Figura 8-4. Tecnología Binder Jetting [45]	66
Figura 8-5. Tecnología Directed Energy Deposition [47]	66
Figura 8-6. Tecnología de Material Extrusion [49]	67
Figura 8-7. Tecnología de Material Jetting [51]	67
Figura 8-8. Tecnología de Sheet Lamination [53]	68
Figura 8-9. Tecnología de Vat Polymerization [55]	68
Figura 8-10. Todas las piezas de la impresora Ender Pro i3	69
Figura 8-11. Impresora Ender Pro i3 lista para imprimir	70
Figura 8-12. Partes de una impresora 3D [56]	71
Figura 8-13. Software CURA usado en el proyecto.	72
Figura 8-14. Previsualización por capas de la pieza base del motor en CURA	73
Figura 8-15. Características principales del ABS [57]	74
Figura 8-16. Características principales del PLA [57]	75
Figura 8-17. Características principales del PP [57]	76
Figura 8-18. Características principales del Nylon [57]	77
Figura 8-19. Características principales del PETG [57]	78
Figura 8-20. Soportes en una figura de ejemplo [58]	79
Figura 8-21. Acabado superficial en función de la altura de capas [59]	80
Figura 8-22. Relleno de una pieza en función de la densidad [59]	80
Figura 9-1. Análisis de una pieza por fatiga [60]	89

NOTACIÓN

Q	Calor transmitido
∂x	Derivada parcial de x
x°	Espesor del material
k	Conductividad térmica
A	Área de la superficie de contacto
Δt	Diferencial de tiempo
C_p	Calor específico del material
$\dot{q}_G$	Calor generado por unidad de volumen
α	Difusividad térmica
ρ	Densidad del material

1 INTRODUCCIÓN

El proyecto que a continuación se presenta consiste en el modelado, recreación virtual y análisis termodinámico de un motor Stirling tipo beta. Para la realización de todos los componentes del motor se dispone de todos los planos, con su respectivo ensamblaje de todas las piezas, y que se mostrarán paulatinamente en apartados posteriores.

Asimismo, se realizará un repaso a la historia de las máquinas y mecanismos para llegar hacia donde estamos hoy en día y de la importancia que supuso el motor Stirling para la revolución industrial. También, se explicará ciertas aplicaciones a futuro que puede tener este motor.

1.1 Propósito y objetivos

El motor Stirling dota de más de 200 años de antigüedad desde su invención y no se ha podido conseguir que sea producido en masa. Éste fue retirado rápidamente por los motores de combustión interna, sin embargo, el motor Stirling resulta ser un motor de ciclo cerrado, extremadamente eficiente, y si es usado con fuentes de energía renovable, puede llegar a ser muy poco contaminante. La pregunta que nos podríamos hacer sería la siguiente: ¿Por qué no se ha encontrado ninguna utilidad para este tipo de motor con estas magníficas características?

En este Proyecto, se indagará sobre las posibles aplicaciones a futuro, se explicará la historia de los motores desde la primera máquina de vapor hasta los motores de nuestros días, y se hará un modelado del motor Stirling, además de una simulación térmica por elementos finitos. Se usará como software principal, SolidWorks debido a su gran versatilidad y potencia de cálculo.

1.2 Diseño y fabricación asistidos por ordenador (CAD - CAM)

El diseño y la fabricación asistidos por ordenador (CAD - CAM) es una disciplina que estudia el uso de sistemas informáticos como herramienta de soporte en todos los procesos involucrados en el diseño y fabricación de cualquier tipo de producto. El diseño asistido por ordenador (*Computer-Aided Design*), además de la fabricación asistida por ordenador (*Computer-Aided Manufacturing*), juegan un papel fundamental a la hora de desarrollar o fabricar productos en la industria hoy en día [1].

El proceso convencional que se llevaba a cabo antes de la llegada del CAD para el desarrollo de un producto en una fábrica consistía en la elaboración de planos de ese artículo con su respectiva fabricación de un modelo para comprobar que tanto el diseño, como la fabricación de éste eran idóneos para su producción en masa. Entonces, resulta lógico pensar que cualquier cambio que se quiera llevar a cabo en el diseño de cualquier producto necesita de una modificación en el diseño del modelo. Por lo que es evidente que, cualquier cambio de diseño en la producción acarrea gastos y pérdidas de tiempo tanto en la fabricación de nuevos modelos como en retrasos de la manufactura [2].

El software CAD se utiliza para aumentar la productividad del diseñador, mejorar la calidad del diseño, mejorar las comunicaciones a través de la documentación y crear una base de datos para la fabricación. Los diseños realizados mediante software CAD son útiles para proteger productos e invenciones cuando se utilizan en solicitudes de patentes [2].

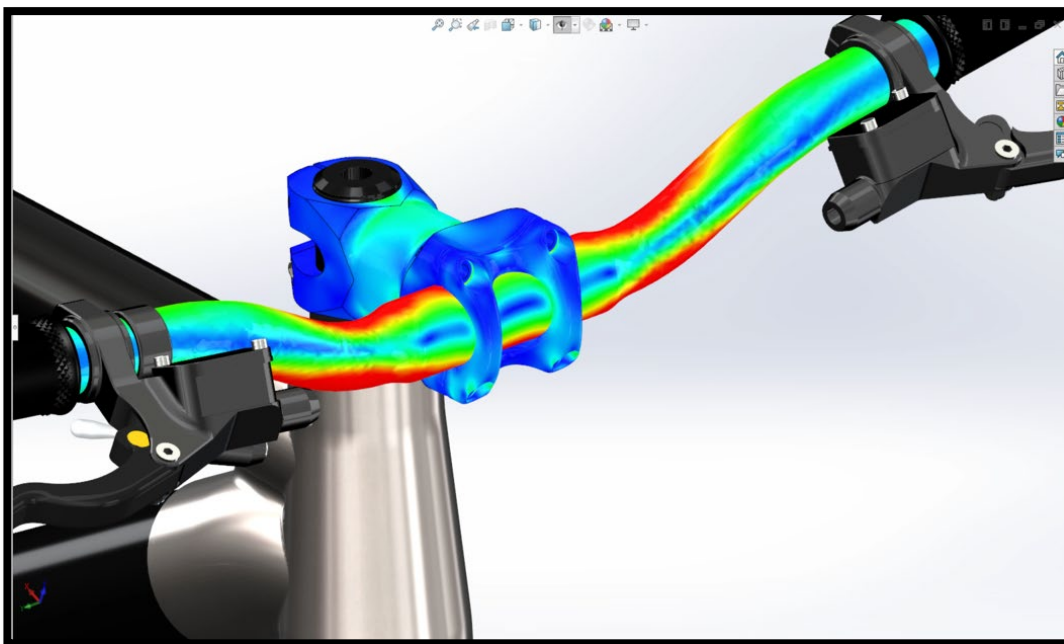


Figura 1-1. Diseño en SolidWorks de un manillar de bicicleta [3]

En cuanto a la filosofía que se ha seguido a la hora de diseñar el motor Stirling, se ha realizado el ensamblaje de tal modo que se organice por grupos de pequeños ensamblajes o *subensamblajes*, los cuales serán explicados en capítulos posteriores. Por otra parte, los planos se irán mostrando paulatinamente a medida que se muestren los modelos tridimensionales de cada pieza en siguientes apartados.

1.3 Estructura

El proyecto se divide en varios capítulos para facilitar así la comprensión del lector.

En el capítulo 1, *Introducción* se da una visión general de lo que se verá en el proyecto, además de un pequeño repaso a la importancia que ha supuesto el diseño y fabricación asistido por ordeandor.

En el capítulo 2, *Estado del arte*, se describe la evolución de los motores, desde la primera máquina de vapor, hasta los motores más modernos, haciendo incapié en la historia del motor Stirling y la de importancia que supuso para el avance de motores posteriores.

En el capítulo 3, *Proceso de modelado en SolidWorks*, se explica paso a paso el modelado de cada una de las piezas del motor Stirling, además de los subconjuntos y conjuntos que lo componen.

En el capítulo 4, *Ensamblaje del motor*, se describe el proceso de ensamblado y los distintos vínculos que se establecen entre piezas.

En el capítulo 5, *Funcionamiento del motor*, se centra en explicar el ciclo termodinámico del motor, y explicar como funciona este.

En el capítulo 6, *Recreación virtual del motor*, se explica un análisis cinemático del motor.

En el capítulo 7, *Análisis térmico por elementos finitos*, se hará por elementos finitos un análisis térmico para poder entender con mejor detalle el funcionamiento del motor.

En el capítulo 8, *Impresión 3D del motor*, se explica en que consiste la fabricación aditiva, cuáles son los procesos más importantes y se mostrará el modelo impreso.

En el capítulo 9, *Conclusiones y proyectos futuros*, se darán unas conclusiones finales del proyecto y un se explicará un desarrollo para proyectos futuros.

2 ESTADO DEL ARTE

En este apartado, se hará un repaso a la historia de la maquina de vapor, hasta llegar al motor Stirling, y luego poder estudiar su rápida sustitución por el motor de combustión interna. Asimismo, se hará un repaso en detalle del motor Stirling en la historia. De los avances que hubo en torno a este.

También, se hablará de las posibles aplicaciones que puede tener este motor para el futuro como un motor de ciclo cerrado, utilizado con energía limpia y con una gran eficiencia.

2.1 La máquina de vapor

La primera máquina térmica de que tenemos evidencia escrita fue inventada por Hero de Alejandría (130 a.C.) y llamada la aeolipila [4]. Es una turbina de vapor primitiva que consiste de un globo hueco soportado por un pivote de manera que pueda girar alrededor de un par de muñones, uno de ellos hueco. Por dicho muñón se puede inyectar vapor de agua, el cual escapa del globo hacia el exterior por dos tubos doblados y orientados tangencialmente en direcciones opuestas y colocados en los extremos del diámetro perpendicular al eje del globo. Al ser expelido el vapor, el globo reacciona a esta fuerza y gira alrededor de su eje [4].

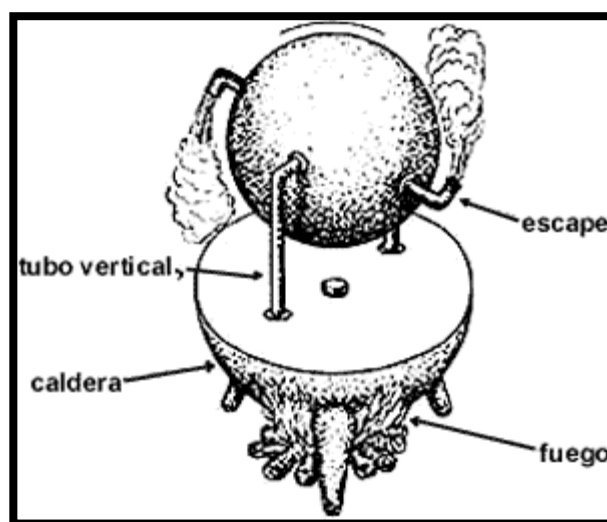


Figura 2-1. Primera máquina de vapor, llamada eolípila [5]

Durante toda la Edad Media se habían aceptado como autoridades indiscutibles los escritos y teorías de los clásicos griegos. En el Renacimiento, debido a los cambios sociales experimentados, se empezaron a comparar

los conocimientos clásicos con la observación directa de la naturaleza y con la realización de experimentos, dando lugar al método científico [6].

En 1698, Thomas Savery patentó una bomba con válvulas manuales para extraer agua de las minas mediante la succión producida por la condensación del vapor. Hacia 1712, otro inglés, Thomas Newcomen, desarrolló una máquina de vapor más eficiente con un pistón que separa el vapor de condensación del agua. En 1765 James Watt mejoró enormemente el motor Newcomen al agregar un condensador separado para evitar calentar y enfriar el cilindro con cada carrera. Luego, Watt desarrolló un nuevo motor que hacía girar un eje en lugar de proporcionar el simple movimiento hacia arriba y hacia abajo de la bomba, y agregó muchas otras mejoras para producir una planta de energía práctica [7].

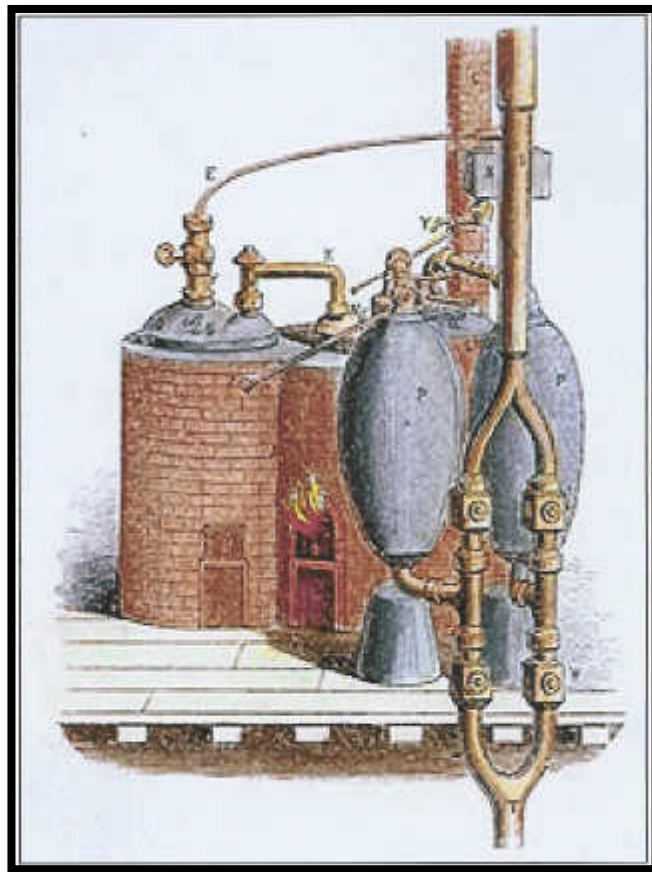


Figura 2-2. La máquina de vapor de Thomas Savery [8]

Los verdaderos avances en la máquina de vapor fueron introducidos por Thomas Newcomen:

...Thomas Newcomen con su máquina de vapor de 1712 quien se puede decir que reunió la mayoría de los elementos esenciales para desarrollar la primera máquina de vapor práctica para la que podría haber una demanda comercial. Este tomó la forma de un motor de viga recíproca instalado a nivel de la superficie que impulsa una sucesión de bombas en un extremo de la viga. El motor, sujeto por cadenas desde el otro extremo de la viga, funcionaba según el principio atmosférico o de vacío [9].

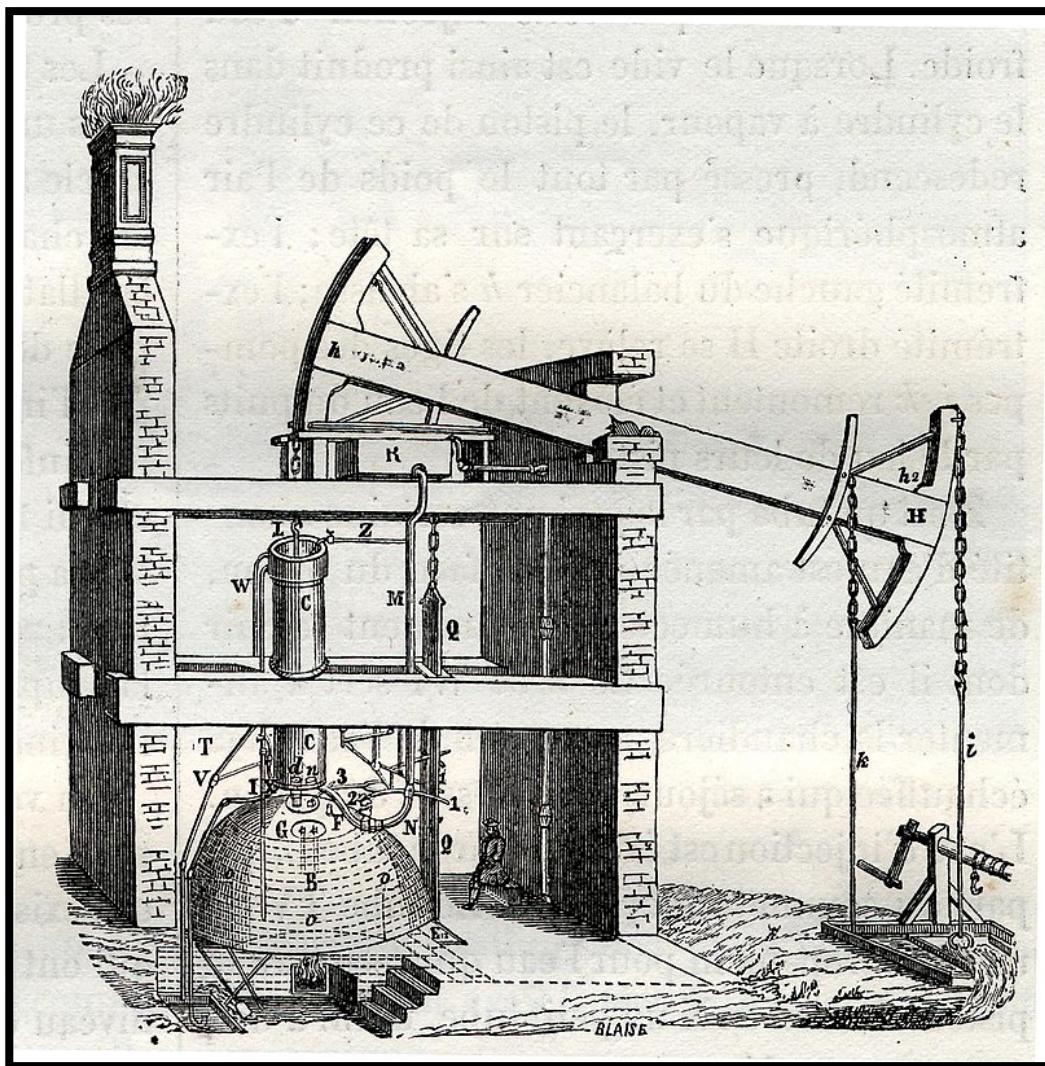


Figura 2-3. Máquina de vapor de Thomas Newcomen [10]

El diseño de Newcomen utilizó algunos elementos de conceptos anteriores. Al igual que el diseño de Savery, el motor de Newcomen usaba vapor, enfriado con agua, para crear un vacío. Sin embargo, a diferencia de la bomba de Savery, Newcomen usó la aspiradora para tirar de un pistón en lugar de tirar del agua directamente. El extremo superior del cilindro estaba abierto a la presión atmosférica y, cuando se formó el vacío, la presión atmosférica sobre el pistón lo empujó hacia el interior del cilindro. El pistón se lubricaba y sellaba con un chorrito de agua de la misma cisterna que suministraba el agua de refrigeración. Además, para mejorar el efecto de enfriamiento, roció agua directamente en el cilindro. [9]

El uso del pistón y la viga permitió que el motor Newcomen accionara bombas a diferentes niveles en toda la mina, además de eliminar la necesidad de vapor a alta presión. Todo el sistema estaba aislado en un solo edificio en la superficie. Aunque ineficientes y extremadamente pesados en carbón (en comparación con los motores posteriores), estos motores levantaron volúmenes de agua mucho mayores y desde mayores profundidades de lo que había sido posible anteriormente. Más de 100 motores Newcomen se instalaron en Inglaterra en 1735, y se estima que hasta 2000 estaban en funcionamiento en 1800 [9].

John Smeaton realizó numerosas mejoras en el motor Newcomen, en particular los sellos hidráulicos (dispositivos los cuales tratan de impedir la salida (o entrada) de fluido de una máquina o recipiente [11]), y al mejorarlos pudo casi triplicar su eficiencia. También prefirió usar ruedas en lugar de vigas para transferir potencia desde el cilindro, lo que hizo que sus motores fueran más compactos. Smeaton fue el primero en

desarrollar una teoría rigurosa del diseño de funcionamiento de la máquina de vapor [9]. Trabajó hacia atrás desde el rol previsto para calcular la cantidad de energía que se necesitaría para la tarea, el tamaño y la velocidad de un cilindro que la proporcionaría, el tamaño de la caldera necesaria para alimentarla y la cantidad de combustible que consumiría. Estos se desarrollaron empíricamente después de estudiar docenas de motores Newcomen en Cornwall y Newcastle, y construir un motor experimental propio en su casa en Austhorpe en 1770 [9].

James Watt, mientras trabajaba en la Universidad de Glasgow como fabricante y reparador de instrumentos en 1759, conoció el poder del vapor gracias al profesor John Robison. Fascinado, Watt se dedicó a leer todo lo que pudo sobre el tema y desarrolló de forma independiente el concepto de calor latente, publicado recientemente por Joseph Black en la misma universidad. Cuando Watt se enteró de que la Universidad poseía un pequeño modelo funcional de un motor Newcomen, presionó para que lo devolvieran de Londres, donde estaba siendo reparado sin éxito. Watt reparó la máquina, pero descubrió que apenas funcionaba incluso cuando estaba completamente reparada [9].

Después de trabajar con el diseño, Watt concluyó que el 80% del vapor utilizado por el motor se desperdiciaba. En lugar de proporcionar fuerza motriz, se usaba para calentar el cilindro. En el diseño de Newcomen, cada carrera de potencia se iniciaba con un chorro de agua fría, que no solo condensaba el vapor, sino que también enfriaba las paredes del cilindro. Este calor tuvo que ser reemplazado antes de que el cilindro aceptara vapor nuevamente. En la locomotora Newcomen el calor era suministrado únicamente por el vapor, por lo que cuando se volvió a abrir la válvula de vapor, la gran mayoría se condensó en las paredes frías tan pronto como se admitió en el cilindro. Tomó una cantidad considerable de tiempo y vapor antes de que el cilindro se calentara nuevamente y el vapor comenzara a llenarlo [9].

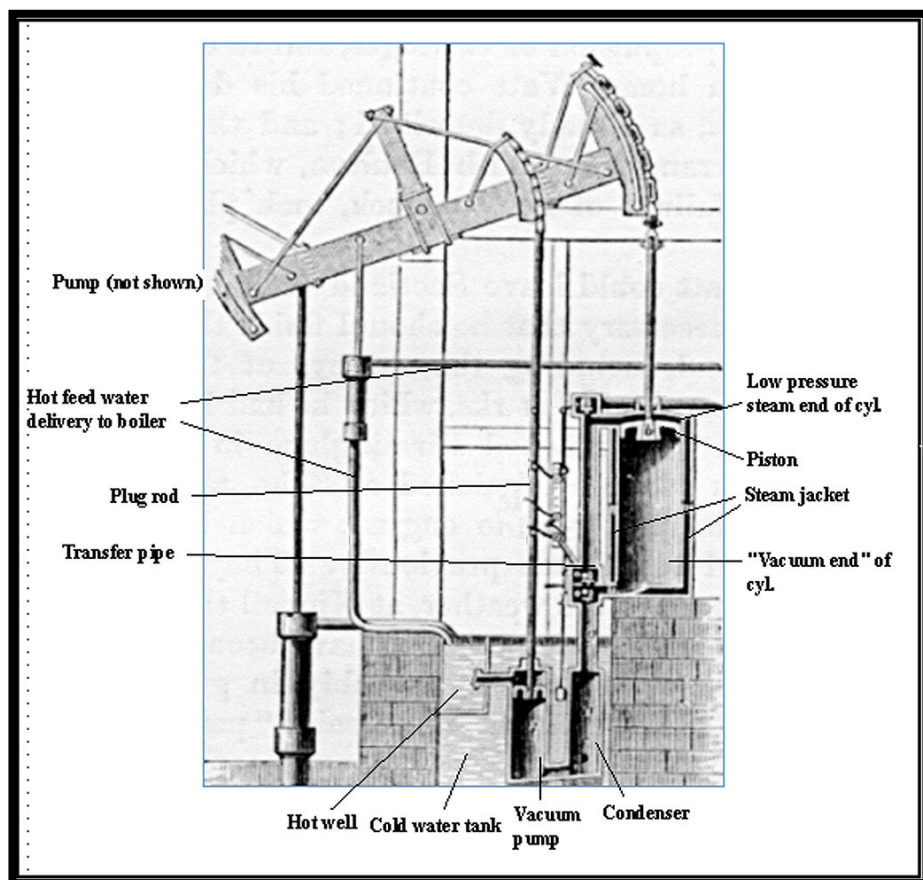


Figura 2-4. Máquina de vapor de James Watt [11]

Watt desarrolló un motor de doble acción en el que el vapor impulsaba el pistón en ambas direcciones, lo que aumentaba la velocidad y la eficiencia del motor. El principio de doble acción también aumentó significativamente la potencia de un motor de tamaño físico dado [12].

Boulton & Watt desarrolló el motor alternativo en el tipo rotativo. A diferencia del motor Newcomen, el motor Watt podría funcionar con la suficiente suavidad como para conectarse a un eje de transmisión, a través de engranajes planetarios y solares, para proporcionar potencia giratoria junto con cilindros de condensación de doble acción. El primer ejemplo se construyó como demostrador y se instaló en la fábrica de Boulton para trabajar con máquinas para lapear (pulir) botones o similares. En las primeras máquinas de vapor, el pistón generalmente está conectado por una varilla a una viga equilibrada, en lugar de directamente a un volante, por lo que estos motores se conocen como motores de viga.

Las primeras máquinas de vapor no proporcionaban una velocidad lo suficientemente constante para operaciones críticas como el hilado de algodón. Para controlar la velocidad, el motor se utilizó para bombear agua para una rueda hidráulica, que acciona la maquinaria.

A medida que avanzaba el siglo XVIII, se pedían presiones más elevadas; Watt se resistió fuertemente a esto, que usó el monopolio que le otorgó su patente para evitar que otros construyeran motores de alta presión y los usaran en vehículos. Desconfiaba de la tecnología de calderas de la época, la forma en que estaban construidas y la resistencia de los materiales utilizados.

Las importantes ventajas de los motores de alta presión fueron:

1. Podrían hacerse mucho más pequeños que antes para una potencia de salida determinada. Por lo tanto, existía la posibilidad de desarrollar máquinas de vapor que fueran lo suficientemente pequeñas y potentes para propulsarse a sí mismas y a otros objetos. Como resultado, la energía de vapor para el transporte se convirtió ahora en una práctica en forma de barcos y vehículos terrestres, lo que revolucionó los negocios de carga, los viajes, la estrategia militar y, esencialmente, todos los aspectos de la sociedad.
2. Debido a su tamaño más pequeño, eran mucho menos costosos.
3. No requerían las cantidades significativas de agua de refrigeración del condensador que necesitan los motores atmosféricos.
4. Podrían diseñarse para funcionar a velocidades más altas, haciéndolos más adecuados para impulsar maquinaria.

Las desventajas fueron:

1. En el rango de baja presión, eran menos eficientes que los motores de condensación, especialmente si el vapor no se usaba de manera expansiva.
2. Eran más susceptibles a las explosiones de calderas [12].

Alrededor de 1811, Richard Trevithick tuvo que actualizar un motor de bombeo Watt para adaptarlo a una de sus nuevas grandes calderas cilíndricas de Cornualles. Cuando Trevithick se fue a Sudamérica en 1816, William Sims continuó con sus mejoras. Paralelamente, Arthur Woolf desarrolló un motor compuesto con dos cilindros, de modo que el vapor se expandía en un cilindro de alta presión antes de liberarse en uno de baja presión. La eficiencia fue mejorada aún más por Samuel Groase, quien aisló la caldera, el motor y las tuberías.

La presión de vapor por encima del pistón se incrementó eventualmente hasta alcanzar 40 psi (0,28 MPa) o incluso 50 psi (0,34 MPa) y ahora proporcionó gran parte de la potencia para la carrera descendente; al mismo tiempo se mejoró la condensación [9]. Esto aumentó considerablemente la eficiencia y los motores de bombeo adicionales en el sistema de Cornualles (a menudo conocidos como motores de Cornualles) continuaron construyéndose nuevos a lo largo del siglo XIX. Los motores Watt más antiguos se actualizaron para adaptarse [9].

La adopción de estas mejoras de Cornualles fue lenta en las áreas de fabricación textil donde el carbón era barato, debido al mayor costo de capital de los motores y al mayor desgaste que sufrían. El cambio solo comenzó en la década de 1830, por lo general mediante la adición de otro cilindro (de alta presión) [13].

Otra limitación de las primeras máquinas de vapor era la variabilidad de la velocidad, lo que las hacía inadecuadas para muchas aplicaciones textiles, especialmente la hilatura. Con el fin de obtener velocidades constantes, las primeras fábricas textiles accionadas por vapor utilizaban la máquina de vapor para bombear agua a una rueda hidráulica, que impulsaba la maquinaria [14].

Muchos de estos motores se suministraron en todo el mundo y brindaron un servicio confiable y eficiente durante muchos años con un consumo de carbón muy reducido. Algunos de ellos eran muy grandes y el tipo continuó construyéndose hasta la década de 1890 [9].

2.2 El motor Stirling

En el apartado anterior se ha visto un repaso histórico de la máquina de vapor, desde los años 130 a.C. hasta finales del siglo XIV, pero no se ha hecho mención en ningún momento al motor Stirling. Y es que éste, a pesar de la gran innovación que hubo detrás de este motor, fue totalmente relegado por la máquina de vapor de James Watt [16].

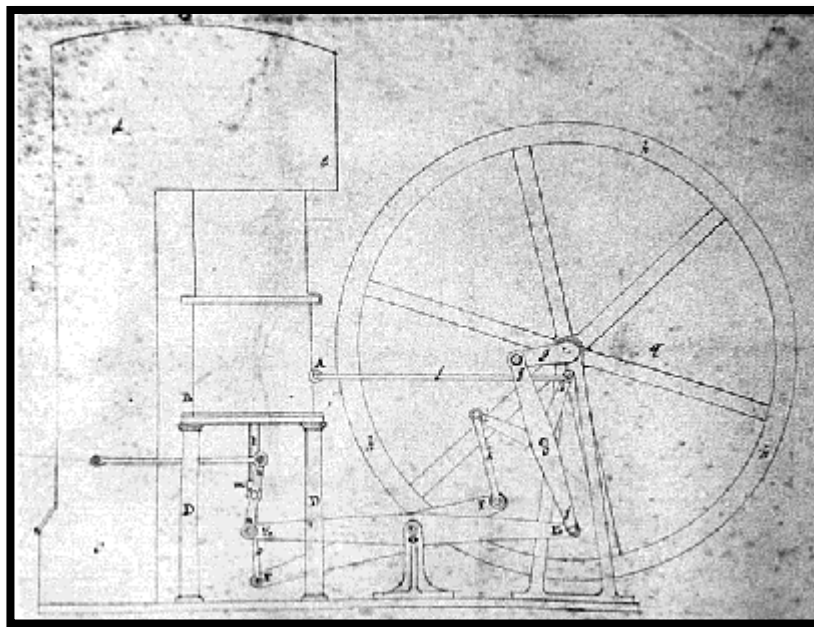


Figura 2-5. Ilustración de la solicitud de patente de Robert Stirling en 1816 [17]

Concebido originalmente en 1816 por Robert Stirling como un motor primario industrial para rivalizar con la máquina de vapor, su uso práctico se limitó en gran medida a aplicaciones domésticas de baja potencia durante más de un siglo [15].

...El desarrollo posterior de Robert Stirling y su hermano James, un ingeniero, dio lugar a patentes para varias configuraciones mejoradas del motor original, incluida la presurización, que en 1843 había aumentado la potencia lo suficiente como para impulsar toda la maquinaria en una fundición de hierro de Dundee.

Aunque ha sido controvertido, se supone ampliamente que los objetivos del inventor no eran solo ahorrar combustible, sino también crear una alternativa más segura a las máquinas de vapor de la época, cuyas calderas explotaban con frecuencia, causando muchas lesiones y muertes.

La necesidad de que los motores Stirling funcionen a temperaturas muy altas para maximizar la potencia y la eficiencia expuso las limitaciones en los materiales del día, y los pocos motores que se construyeron en esos primeros años sufrieron fallas inaceptablemente frecuentes.

Numerosos fallos inaceptables que se producían en los motores Stirling, hicieron que fueran sustituidos por máquinas de vapor, también debido a que las calderas de vapor cada vez se estaban volviendo más seguras.

Durante la primera parte del siglo XX, el papel del motor Stirling como "motor doméstico" fue asumido gradualmente por motores eléctricos y pequeños motores de combustión interna. A fines de la década de 1930, se olvidó en gran medida, solo se producía para juguetes y algunos pequeños ventiladores de ventilación [16].

La segunda etapa de estos motores tuvo lugar a finales de los años 30, cuando unos ingenieros de Philips intentaron poner a punto un motor Stirling para alimentar unos equipos eléctricos. En esta época, el conocimiento sobre la física térmica y los fluidos térmicos era mucho mayor, y además se disponía de nuevos materiales, como por ejemplo el acero inoxidable, por lo que los resultados fueron mejores. En los años 50 estos ingenieros lograron que su motor Stirling alcanzara una potencia 30 veces superior a los primeros modelos. Este hecho suscitó un gran interés por parte de la comunidad científica, y se propusieron gran cantidad de proyectos y estudios sobre el tema. Después de este auge momentáneo, de nuevo vino un periodo de tiempo que duró varias décadas en el que los motores Stirling fueron relegados a un segundo plano [18].

La crisis del petróleo de 1973 reabrió el interés, pero fue la NASA, con su investigación sobre sistemas de alta eficiencia térmica alimentados por energía solar, la que le dio un nuevo impulso a esta tecnología que parecía obsoleta. Durante estos últimos años, la popularidad de las máquinas Stirling ha aumentado debido al gran número de características favorables que presentan, ya que tienen el potencial para ser mucho más eficientes que los motores diesel o gasolina [18].

2.3 El futuro del motor Stirling

En los últimos siglos, la humanidad ha experimentado el mayor avance tecnológico y científico de su historia. Esto ha hecho posible una importante mejora en la calidad de vida gracias a la aparición de nuevas tecnologías. Sin embargo, la otra cara de la moneda nos muestra el acelerado deterioro del medio ambiente, por lo que, el uso de fuentes de energía renovable se hace cada vez más esencial.

Durante los últimos años, ha habido un notable crecimiento en formas de generar energía renovable, ya sea por el sol, viento, biomasa, etc [19]. Con la ayuda de la energía solar, un conjunto de motores Stirling podrían generar electricidad en un proyecto llamando Maricopa Solar, que se está desarrollando en Arizona, Estados Unidos [20].



Figura 2-6. Recolector solar del proyecto Maricopa Solar [21]

Este proyecto está ya en funcionamiento y genera 1,5 MW gracias a los 60 recolectores situados bajo el sol. El funcionamiento es el siguiente: Cada recolector sigue la trayectoria del sol para recolectar los máximos rayos de sol posibles. Éste, está formado por cristales orientados de tal forma que, al incidir los rayos sobre estos, reflejen al centro de la estructura [22]. Toda esa energía acumulada se transporta hacia un motor Stirling para generar energía mecánica a través del sol sin producir ningún contaminante, ya que el motor Stirling, al ser de ciclo cerrado, sólo necesita de una fuente de calor para su funcionamiento [16].

Se prevé que este tipo de solución se siga implementando en el futuro debido a su bajo coste, gran eficiencia y gran capacidad de producir energía sin dañar el medio ambiente [21].

3 PROCESO DE MODELADO EN SOLIDWORKS

En este capítulo vamos a describir por partes el proceso de modelado del motor Stirling, quedando dividido en subconjuntos que luego se irán ensamblando en un conjunto total. De esta forma, se podrá ir explicando cada subconjunto de manera más organizada y con una mejor comprensión. Además, un repaso a los softwares más importantes usados en ingeniería mecánica y una explicación del porqué se ha utilizado el software de SolidWorks para la realización de este proyecto.

4	Rodamientos de bolas de una hilera	MR84	41	Acero
4	Rodamientos de bolas de una hilera	618/8	40	Acero
6	Anillo de retención para ejes	3,2 DIN 6799	39	Acero
4	Anillo de retención para agujeros	16x1 DIN 472	38	Acero
2	Tornillos	M4x12 DIN 7991	37	Acero
1	Tuerca	M5 DIN 934	36	Acero
1	Tornillo	M2 x 5 DIN 913	35	Acero
5	Tornillo	M3 x 5 DIN 913	34	Acero
2	Tornillo	M3 x 16 DIN 912	33	Acero
4	Tornillo	M3 x 12 DIN 912	32	Acero
2	Tornillo	M2 x 3 DIN 912	31	Acero
2	Tornillo	M4 x 12 DIN 912	30	Acero
8	Tornillo	M3 x 10 DIN 912	29	Acero
6	Tornillo	M3 x 6 DIN 912	28	Acero
1		Cilindro calentamiento	27	Acero
1		Soporte cilindro	26	Aluminio
1		Junta	25	Plástico
1		Varilla	24	Aluminio
1		Tapa depósito aceite	23	Aluminio
1		Depósito aceite	22	Aluminio
1		Guía aceite	21	Acero
1		Cilindro refrigeración	20	Bronce
1		Base cilindro desplazador	19	Aluminio
1		Cabeza cilindro desplazador	18	Aluminio
1		Cilindro desplazador	17	Aluminio
1		Pistón	16	Aluminio
4		Eje biela	15	Acero
1		Guía pistón	14	Acero
1		Viga 2	13	Aluminio
1		Viga 1	12	Aluminio
4		Biela	11	Aluminio
2		Muñequilla	10	Acero
2		Contrapeso	9	Acero
2		Cigüeñal	8	Aluminio
2		Engranaje	7	Bronce
1		Volante	6	Aluminio
1		Árbol 2	5	Acero
1		Árbol 1	4	Acero
2		Brida de rodamiento	3	Aluminio
1		Base	2	Aluminio
1		Soporte cigüeñal	1	Aluminio
CTDAD	DENOMINACIÓN	PIEZA	ELEMENTO	MATERIAL

Figura 3-1. Numeración de todas las piezas del conjunto [23]

Los planos [23] han sido obtenidos de una página web de dibujo técnico perteneciente a la Universidad Miguel Hernández de Elche.

El conjunto tiene un total de 41 piezas diferentes, en su mayoría de aluminio y acero, y con un total de 86 piezas. El conjunto Motor Stirling va a constar de tres subconjuntos. El primero que trataremos será el conjunto *Base del Motor*, seguido del conjunto *Tornillería y Parte Móvil*.

3.1 Metodología empleada

SolidWorks, como también CATIA V5, Fusion360, AutoCAD, y otros, son softwares de diseño mecánico usados por ingenieros para diseñar y/o modelar piezas. Estas herramientas se basan en el uso de ordenadores para ayudar en la creación, modificación, análisis u optimización de un diseño. El software CAD se utiliza para aumentar la productividad del diseñador, mejorar la calidad del diseño, mejorar las comunicaciones a través de la documentación y crear una base de datos para la fabricación. La salida CAD a menudo se presenta en forma de archivos electrónicos para impresión, mecanizado u otras operaciones de fabricación.

Para la realización de este proyecto, entre todos los softwares de CAD se ha elegido SolidWorks, por su gran versatilidad, su extendido uso, y sencillez.

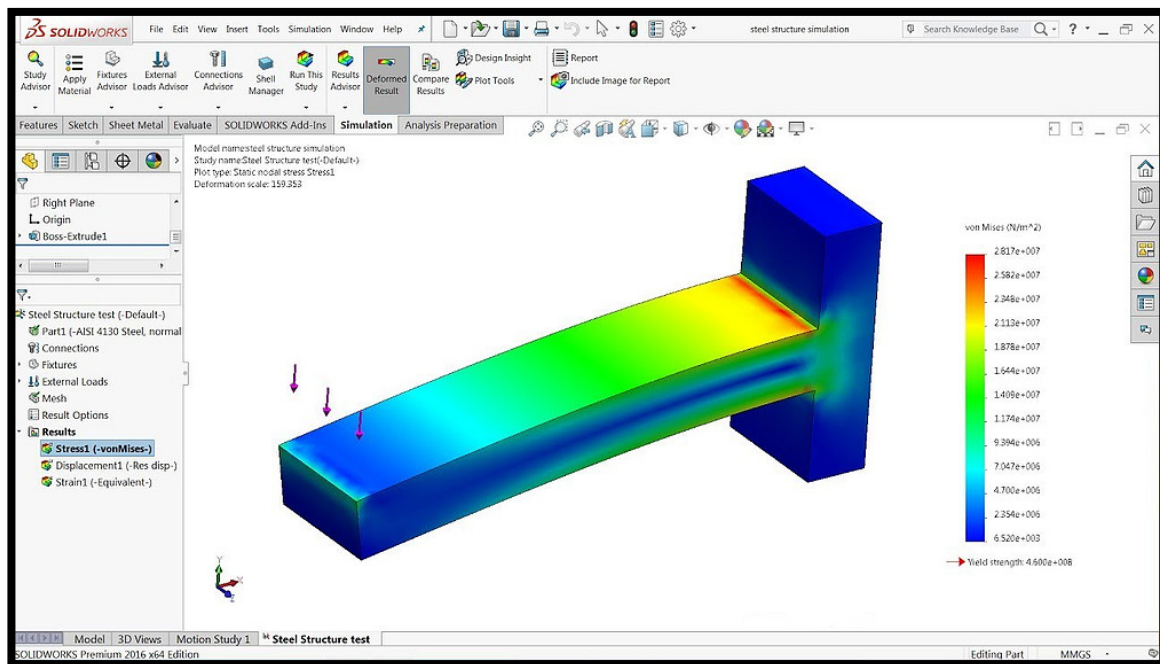


Figura 3-2. Análisis por elementos finitos en SolidWorks [24]

SOLIDWORKS Corp. fue fundada en 1993 por Jon Hirschtick con sede en Masachuset. Con En el año 1995 lanzó su primera versión del CAD 3D al mercado y en 1997 fue adquirida por Dassault Systèmes convirtiéndose en una filial de ésta.

En 1993, el fundador de SOLIDWORKS, Jon Hirschtick, contrató a un equipo de ingenieros con el objetivo explícito de hacer que la tecnología CAD 3D fuera más accesible para todos. Y así lo hicieron desarrollando la primera tecnología de CAD en 3D que se ejecutaba en la plataforma de Windows. En el año 1995 lanzaron su primera versión del CAD 3D al mercado y en dos meses la herramienta ganó reconocimientos por su facilidad de uso. En 1997 el gigante mundial de tecnología Dassault Systèmes S.A. adquirió SOLIDWORKS como filial por 310 millones de dólares [25].

Las funciones o herramientas principales que se han usado para la realización del modelaje del conjunto motor fueron las siguientes:

- **Sketch:** Conexión de curvas o rectas que forman un perfil plano y normalmente cerrado.
- **Extruded Boss/Base:** Extrusión de perfiles cerrados según una dirección.
- **Revolve Boss/Base:** Generación de sólidos mediante revolución de perfil alrededor de un eje de revolución.
- **Extruded Cut:** Vaciado por extrusión de un sólido ya creado.
- **Hole Wizard:** Taladrado de superficies.
- **Rib:** Extrusión de perfil sobre una curva y una guía.
- **Swept Cut:** Vaciado de perfil sobre una curva y una guía.
- **Lofted Boss/Base:** Creación de sólidos de acuerdo a un patrón de secciones variables.
- **Lofted Cut:** Vaciado de sólidos de acuerdo a un patrón de secciones variables.
- **Filled:** Realiza redondeos en aristas.
- **Chamfer:** Realiza chaflanes en aristas.
- **Thread:** Realiza roscado interno o externo alrededor de una superficie cilíndrica.
- **Mirror:** Operación de simetría con respecto a un plano.
- **Linear Pattern:** Repetición de elementos según un patrón lineal.
- **Circular Pattern:** Repetición de elementos según un patrón circular.
- **Plane:** Creación de referencias para la realización de bocetos.

Además de las funciones principales utilizadas para la realización de los subconjuntos y su posterior conjunto total:

- **Lock:** Fija un elemento y en torno a este se van fijando los grados de libertad de los demás.
- **Concentric:** Coincidencia entre ejes.
- **Distance:** Distancia entre caras.
- **Angle:** Ángulo entre caras.
- **Coincident:** Contacto entre caras.

Todas estas han sido las herramientas utilizadas en el proyecto, las cuales se irán explicando con más detalle en capítulos posteriores.

Para la realización de los bocetos, se ha utilizado la herramienta *sketch*. Esta herramienta es muy útil y constituye el primer paso para poder realizar los levantamientos de material con la herramienta *Extrude Base* o también eliminación de material con *Extruded Cut*, además de muchas más herramientas que se pueden hacer partiendo de la herramienta *Sketch*.

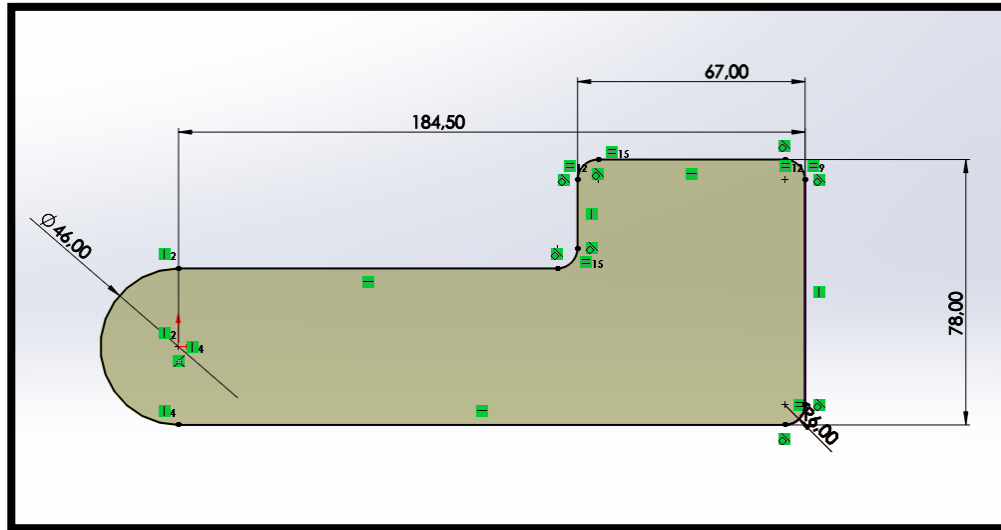


Figura 3-5. Herramienta *sketch* para la base del motor.

Asimismo, una pieza muy importante para el conjunto es la del soporte del cigüeñal. Esta pieza es la encargada de fijar el conjunto a la base. Por esta pieza se producen los movimientos del pistón que son transmitidos a los engranajes que están al otro lado y a su vez al volante de inercia, por lo que la importancia de esta pieza lo hace crucial para el funcionamiento del motor. El material de la pieza será de acero acorde a lo que viene en los planos.

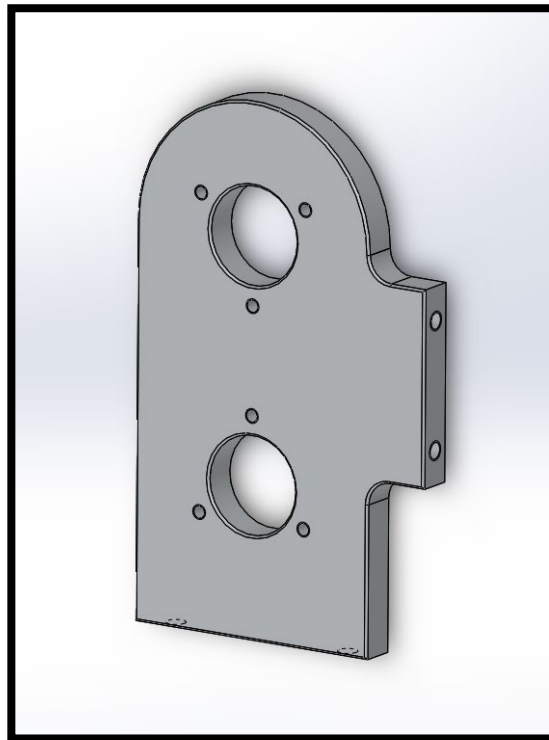


Figura 3-6. Isométrico de la pieza soporte del cigüeñal

3. *Mirror*:

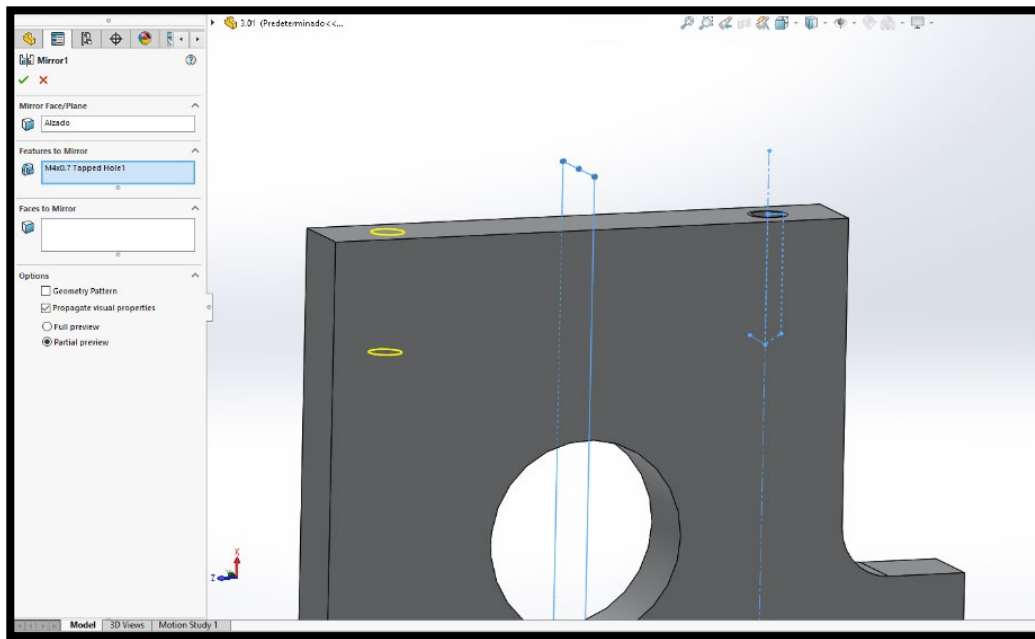


Figura 3-9. Operación *Mirror*

A continuación, hablaremos de una pieza que resulta fundamental para que el funcionamiento del motor, y es el soporte del cilindro de refrigeración. Esta pieza fija el cilindro de refrigeración al soporte del cigüeñal. Esta pieza está fabricada en aluminio y la cual me resultó un poco compleja de diseñar debido a los diferentes agujeros y aberturas que tenía.

Los procesos más importantes seguidos para modelar esta pieza fueron los siguientes:

1. *Cut-Extrude*

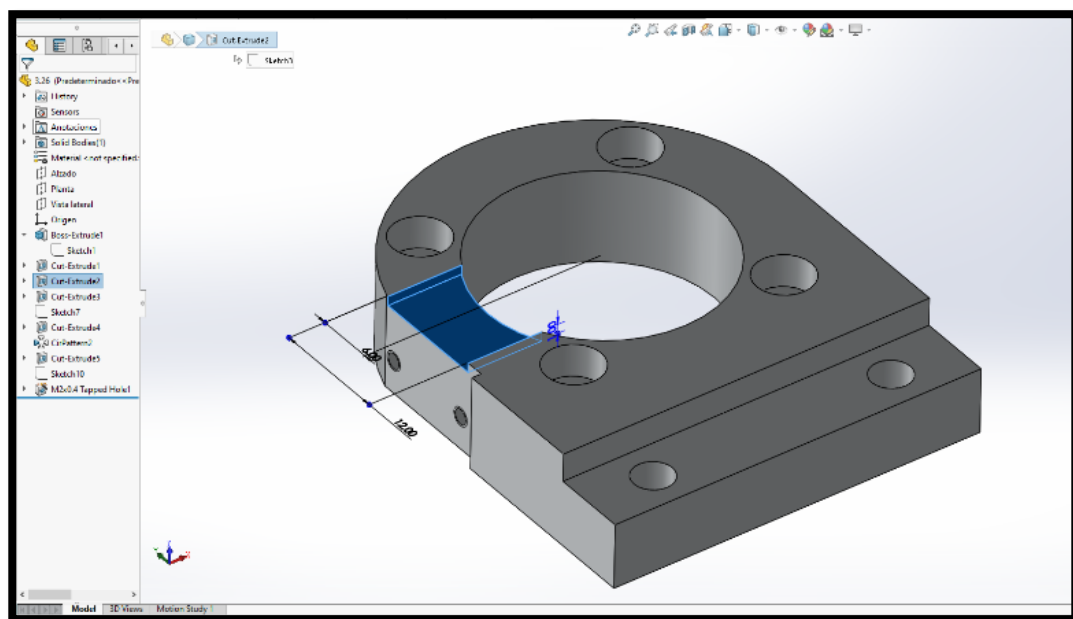


Figura 3-10. Operación *Cut-Extrude*.

2. Circular Pattern:

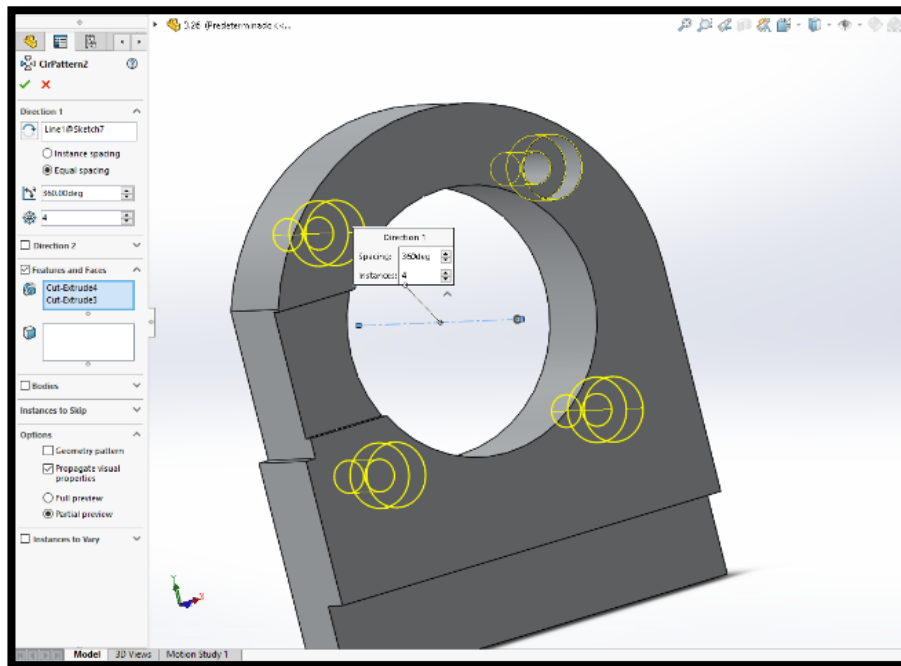


Figura 3-11. Operación *Circular Pattern*.

Otra pieza que resulta fundamental para el funcionamiento del motor, es el cilindro de refrigeración. Este cilindro tiene una tarea muy importante para el funcionamiento del motor Stirling de tipo beta, ya que es la encargada de expulsar el calor lo más rápido posible del interior para poder refrigerar al pistón tan rápido como sea posible. Además, cuenta con 10 aletas y al estar fabricado en bronce, un material más conductor del calor que el aluminio, este puede expulsar el calor que produce el pistón de una manera más eficiente.

Esta pieza ha sido principalmente modelada con una herramienta llamada *Revolve*. Esta herramienta resulta muy útil para realizar piezas simétricas en todo un eje. En este caso, el cilindro es simétrico en todo el eje X. Luego se realizaron los *holes* tanto en la parte superior como inferior del cilindro.

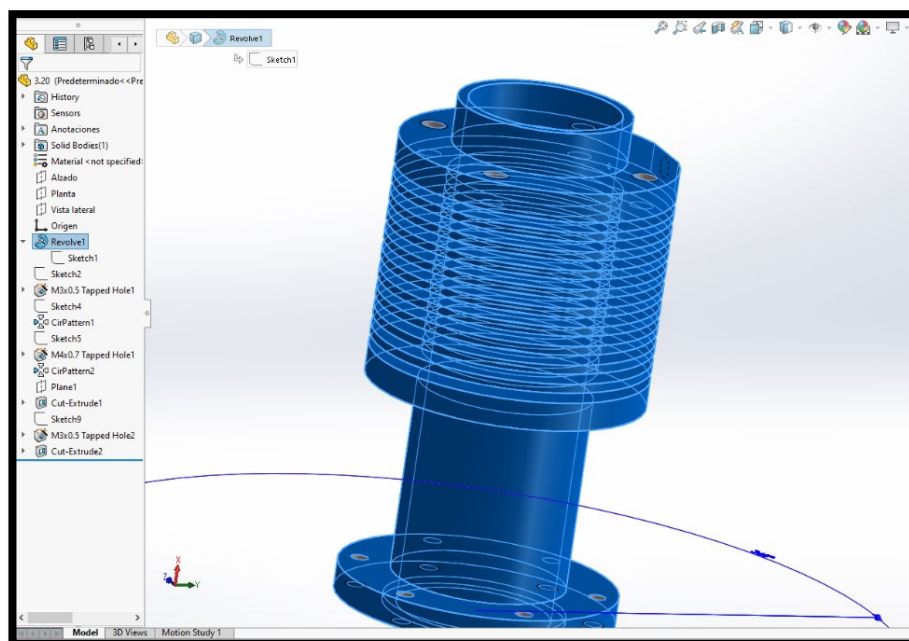


Figura 3-12. Operación *Revolve*.

La siguiente pieza que constituye este subconjunto es el cilindro de calentamiento, el cual se ha modelado de una manera muy similar al anterior cilindro (con la herramienta Revolve). En este caso la pieza se ve de manera transparentada para que pueda observarse el interior del cilindro y más adelante poder ver el movimiento del pistón en su interior.

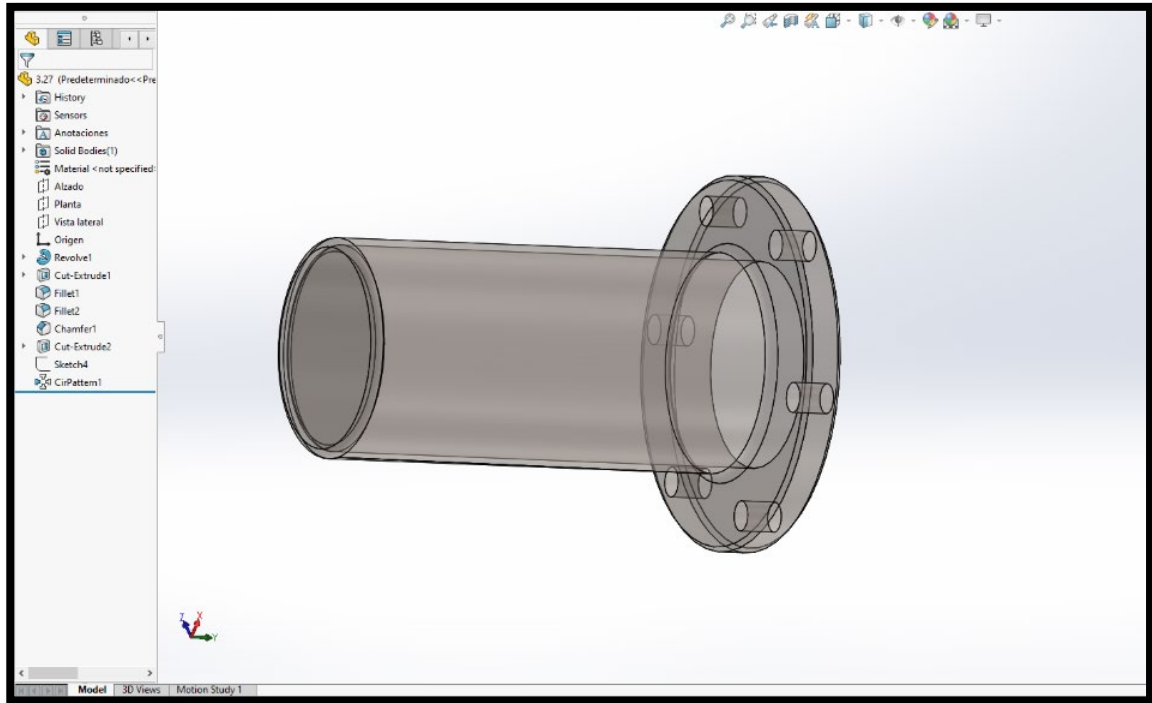


Figura 3-13. Modelado del cilindro de calentamiento

La siguiente pieza es la llamada junta. Esta pieza separa los dos cilindros del motor y resulta de aislante entre ambos para que se traspase el mínimo calor posible del cilindro de calentamiento al cilindro de refrigeración. El objetivo de esta junta resulta en proteger el cilindro de refrigeración del calor entrante del cilindro de calentamiento.

El modelaje de la junta resulta bastante sencillo por lo que no hará falta mostrar los procesos de modelado.

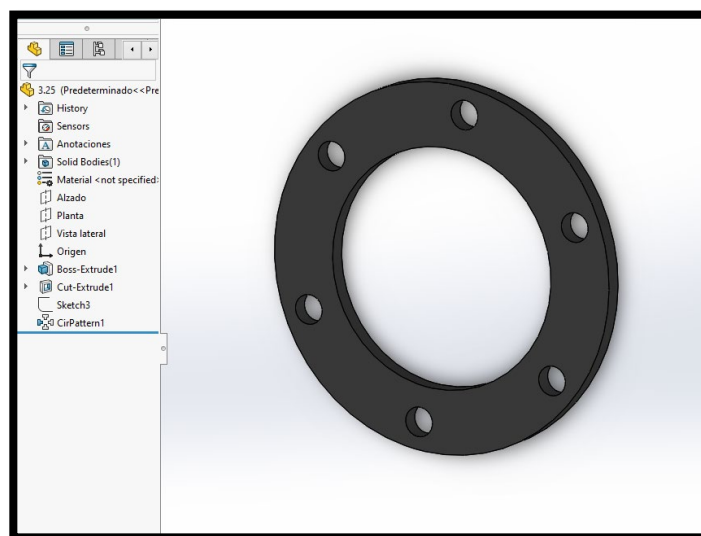


Figura 3-14. Modelado de la junta de goma

La siguiente pieza de este subconjunto se trata del depósito de aceite, el cual se encuentra en la zona superior del cilindro de refrigeración. Esta pieza tiene el objetivo de mantener lubricada la zona interior del cilindro de refrigeración para que el pistón pueda desplazarse sin problemas de manera axial. Este pequeño subconjunto está formado por dos piezas, una de ellas, la tapa superior del depósito, y la otra el depósito en sí.

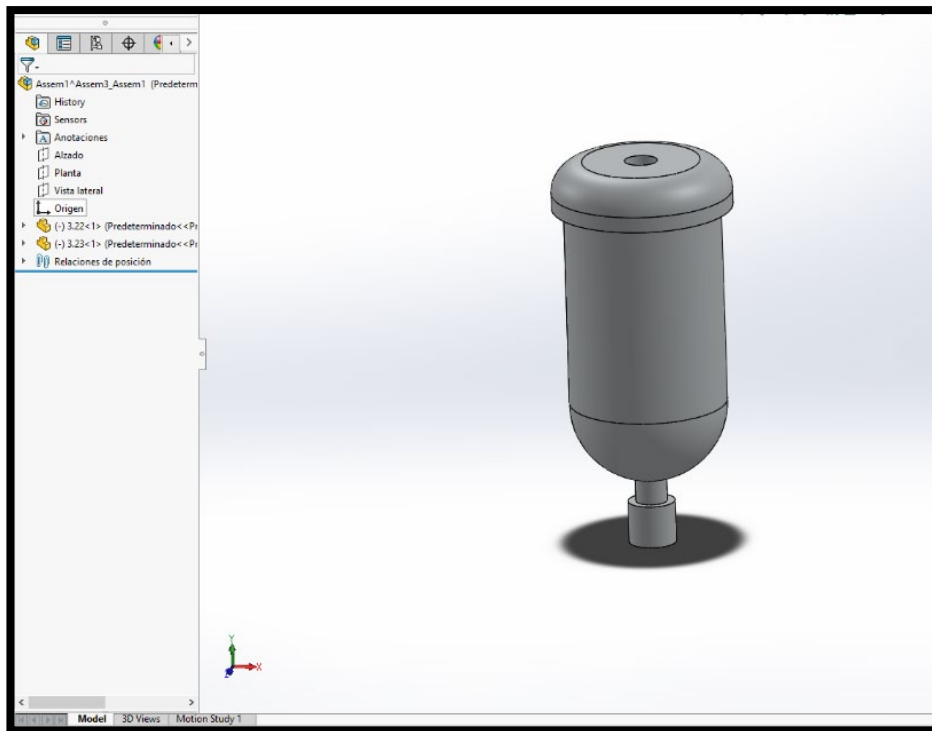


Figura 3-15. Modelado del depósito de aceite

Para la pieza del depósito se ha modelado siguiendo las herramientas *Revolve* y *Hole*, ya explicadas anteriormente, debido a que esta pieza resulta ser simétrica en todo el eje Y.

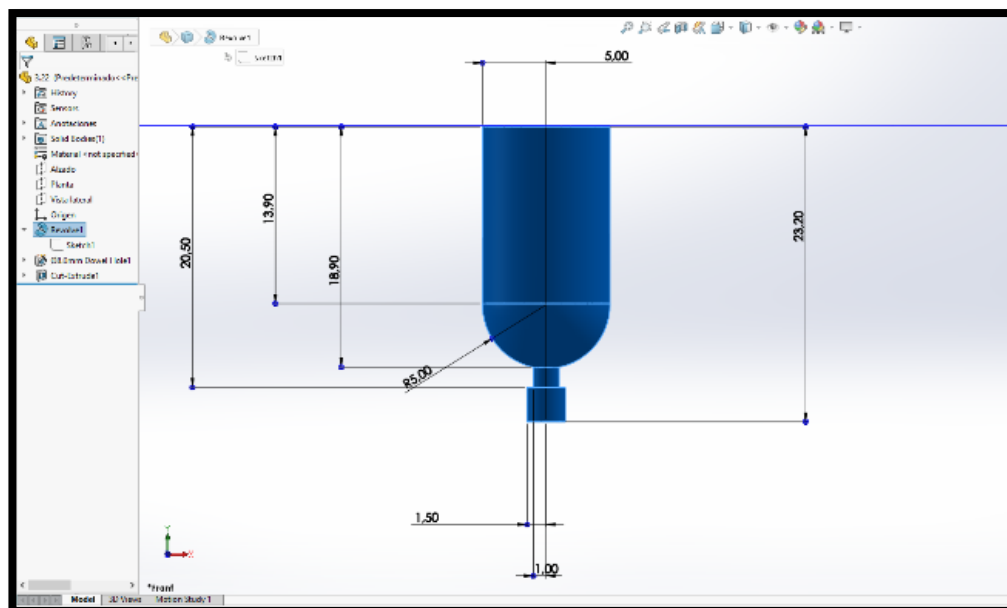
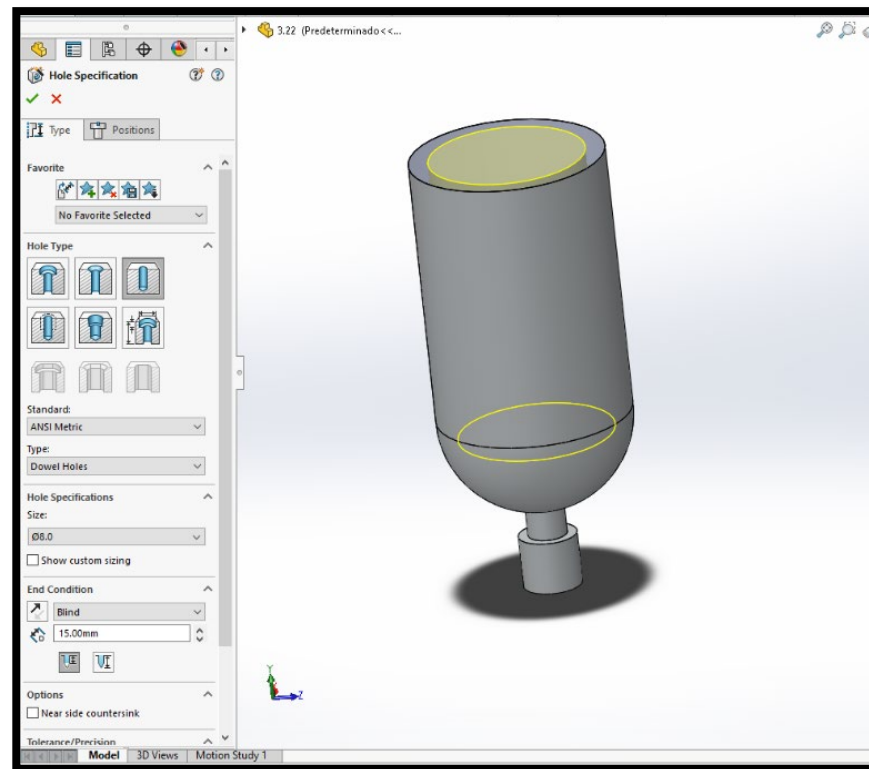


Figura 3-16. Operación de *Revolve*

Figura 3-17. Operación *Hole*

3.3 Conjunto de piezas móviles del motor

El siguiente conjunto que vamos a analizar será el subconjunto comprendido por las piezas móviles del motor Stirling. Estas piezas serán las siguientes: El cilindro desplazador, muñequilla, cigüeñal, varillas de árbol, volante de inercia, eje de biela, soporte de cigüeñal, contrapeso, engranajes, cabeza del cilindro desplazador y el pistón.

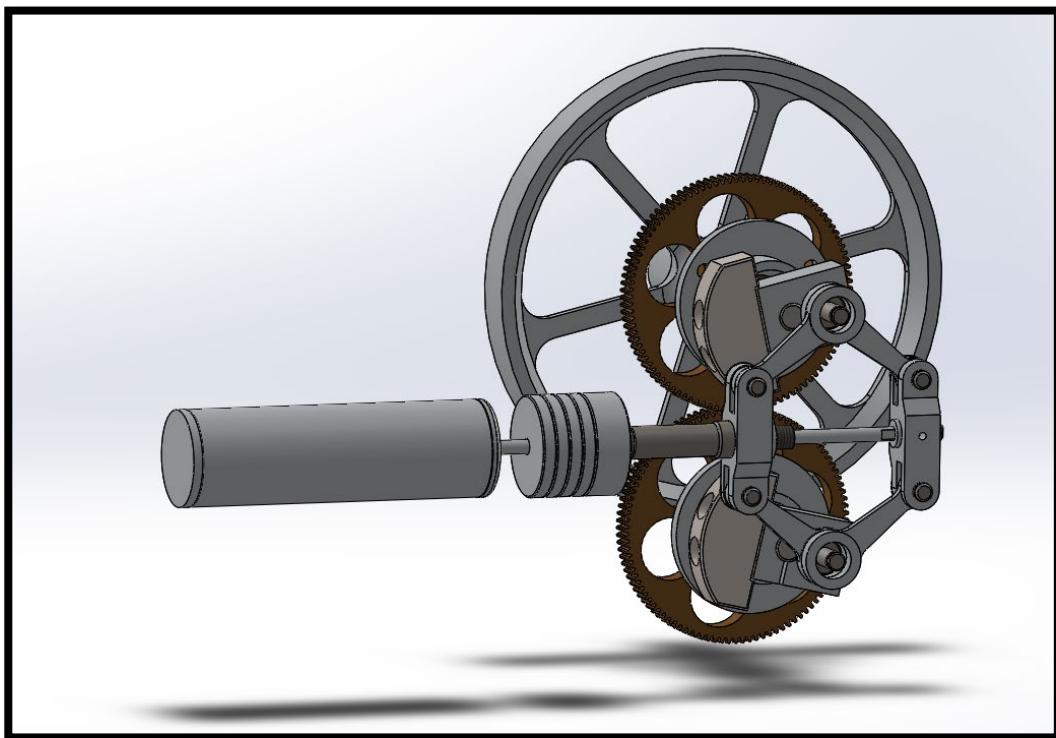


Figura 3-18. Conjunto de piezas móviles del motor

Un elemento que se considera fundamental para el buen funcionamiento del motor es el volante de inercia. El volante es un elemento completamente pasivo que solo aporta inercia adicional al sistema, permitiéndole almacenar energía cinética. Este volante continúa su movimiento por inercia cuando cesa el par motor que lo propulsa. De esta manera, el volante puede resistir una aceleración repentina en un movimiento de rotación. Esto reduce la fluctuación de la velocidad angular. Es decir, el volante se utiliza para suavizar el flujo de energía entre la fuente de energía y su carga [26].

Para el modelado se ha utilizado la herramienta de *Revolve*.

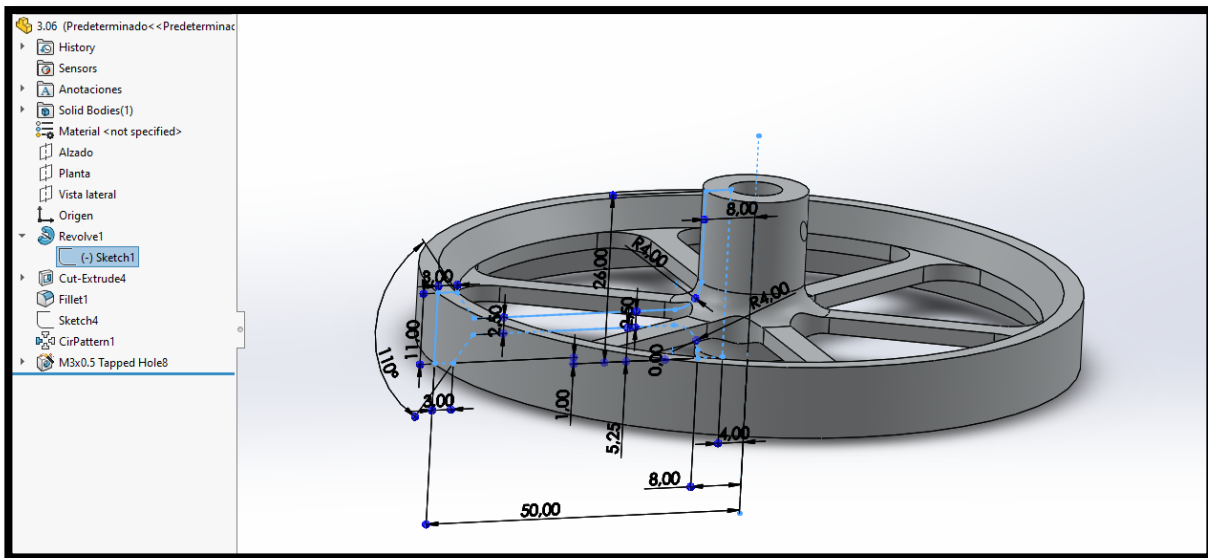


Figura 3-19. Operación *Revolve*.

Otra herramienta utilizada en el modelaje de esta pieza es *Cut-Extrude*, además de *Fillet* y *CirPattern* para repetir la perforación realizada en el volante en todo el eje Z. Además, se le ha hecho un agujero con la herramienta *Hole Wizard* de métrica M3x0,5.

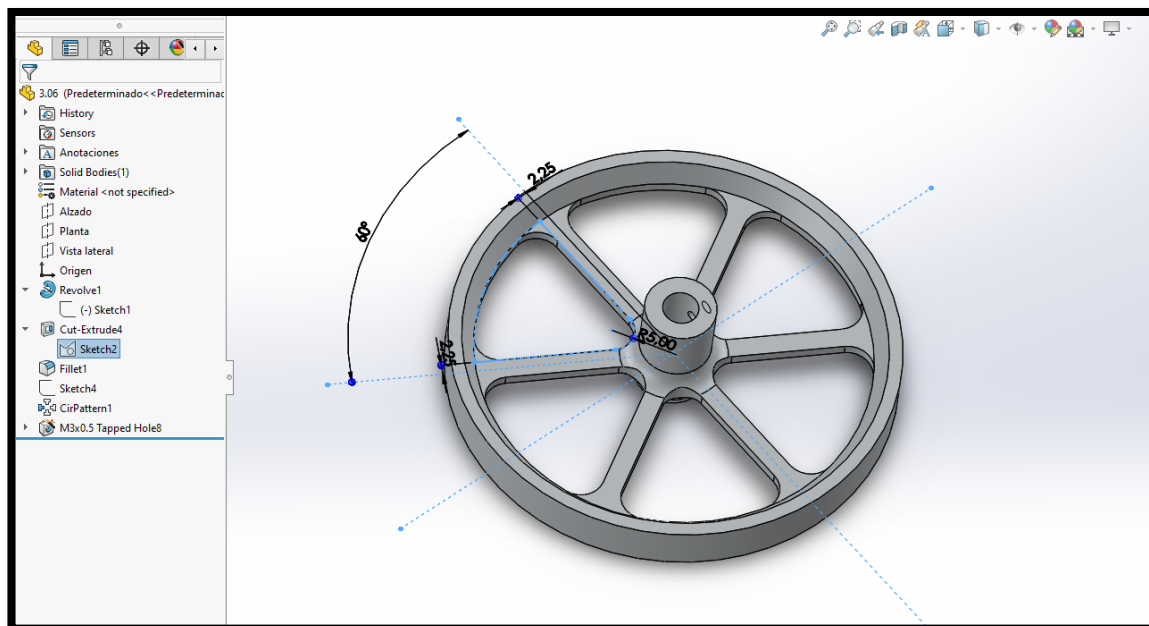


Figura 3-20. Operación *Cut-Extrude*.

La siguiente pieza que analizaremos será el engranaje de transmisión. Éste es el encargado de transmitir la energía cinética proveniente del pistón hacia el otro engranaje y, por ende, a otro sistema conectado. En este caso, los engranajes serán de bronce y el modelado será el siguiente.

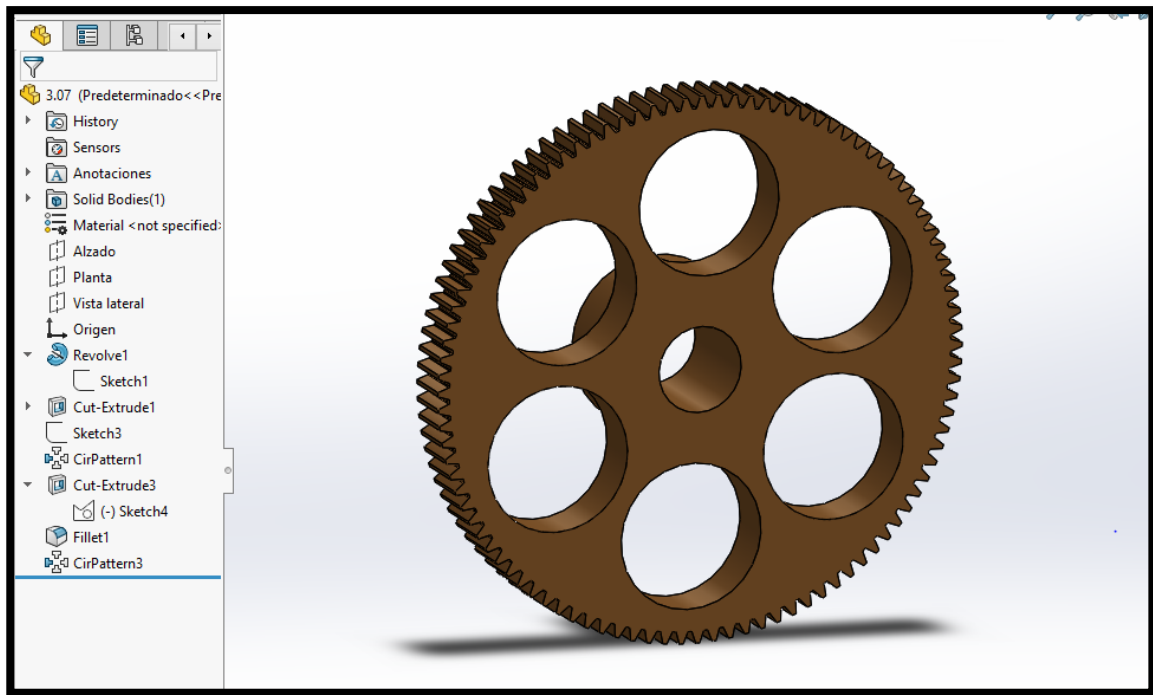


Figura 3-21. Modelado del engranaje de transmisión.

El modelado de un engranaje en herramientas de CAD no suele ser sencillo, por lo que se intentará explicar cómo se ha realizado el modelado y las consideraciones que se han tenido en cuenta.

Hay muchas maneras de poder aproximar el perfil de un engranaje, este caso se ha elegido el método llamado Odontógrafo de Grant [27]. Considerando los datos que tenemos del plano del engraje:

- Módulo: $M = 0,5 \text{ mm}$
- Número de dientes: $Z = 100 \text{ dientes}$
- Diámetro primitivo: $D_p = 100 \text{ dientes}$

Con estos datos proporcionado por el plano, podemos calcular los siguientes parámetros:

- Paso: $p = \pi \cdot M = 1,57 \text{ mm}$
- Espesor del diente $e = p/2 = 0,785 \text{ mm}$
- Diámetro interior: $D_i = D_p - 2,5 \cdot M = 48,75 \text{ mm}$
- Diámetro exterior: $D_e = D_p + 2 \cdot M = 51 \text{ mm}$
- $a = \left(\frac{1}{60}\right) \cdot D_p = 0,833 \text{ mm}$
- Redondeos: $R = 0,166 \cdot M = 0,083 \text{ mm}$
- Radios: $m = n = 9,78 \cdot M = 4,89 \text{ mm}$

Según la tabla 7.4 que se ve la figura 3-22, al tratarse de un engranaje con más de 36 dientes, el factor que se debe utilizar es 9,78.

7.4.- TRAZADOS DEL PERFIL. ODONTOGRAFO DE GRANT

Se puede realizar el trazado de los perfiles mediante arcos de circunferencia de uno o dos radios según el número de dientes o del módulo. En tablas se dan los coeficientes por los que hay que multiplicar al módulo para obtener los radios de los arcos del perfil según el número de dientes. Ver Tabla 7.4.

Número de dientes	Factores que multiplicados por los módulos dan los radios del perfil		Número de dientes	Factores que multiplicados por los módulos dan los radios del perfil		Número de dientes	Factores que multiplicados por los módulos dan los radios del perfil	
	Cabeza	Pie		Cabeza	Pie		Cabeza	Pie
z	c	b	z	c	b	z	c	b
10	2,28	0,69	22	3,49	2,06	34	4,33	3,09
11	2,40	0,83	23	3,57	2,15	35	4,39	3,16
12	2,51	0,96	24	3,64	2,24	36	4,45	3,23
13	2,62	1,09	25	3,71	2,33	37-40	4,20	
14	2,72	1,22	26	3,78	2,42	41-45	4,63	
15	2,82	1,34	27	3,85	2,50	46-51	5,06	
16	2,92	1,46	28	3,92	2,59	52-60	5,74	
17	3,02	1,58	29	3,99	2,67	61-70	6,52	
18	3,12	1,69	30	4,06	2,76	71-90	7,72	
19	3,22	1,79	31	4,13	2,85	91-120	9,78	
20	3,32	1,89	32	4,20	2,93	121-180	13,38	
21	3,41	1,98	33	4,27	3,01	181-360	21,62	

Tabla 7.4

Figura 3-22. Trazados del perfil. Odontografo de Grant [27].

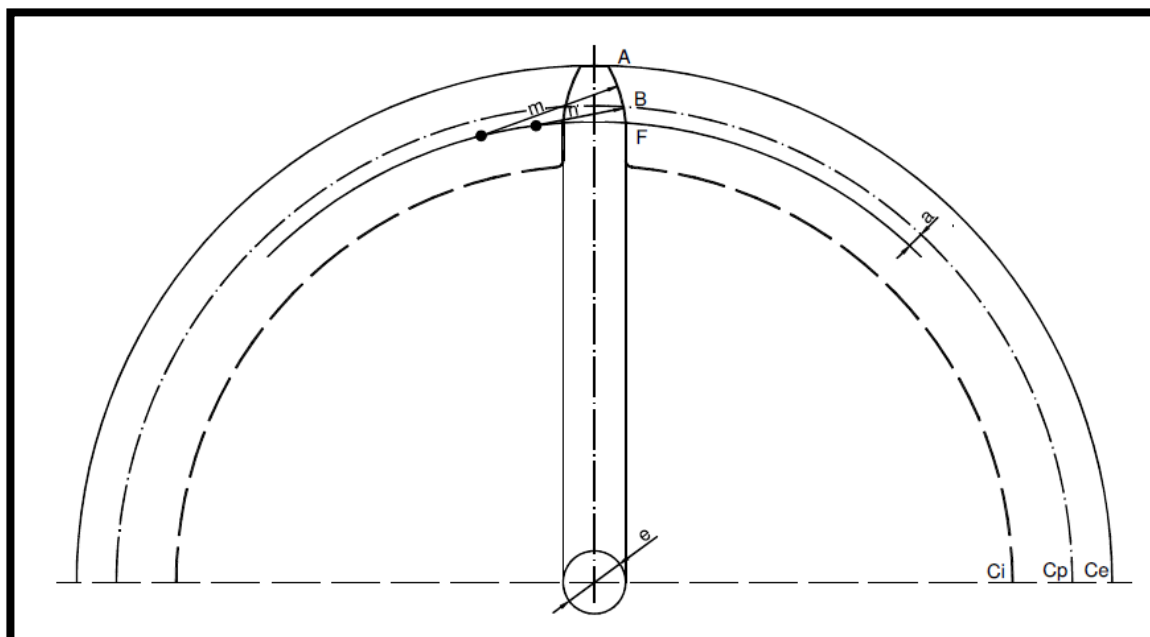


Figura 3-23. Trazado del perfil de acuerdo al Odontografo de Grant [27].

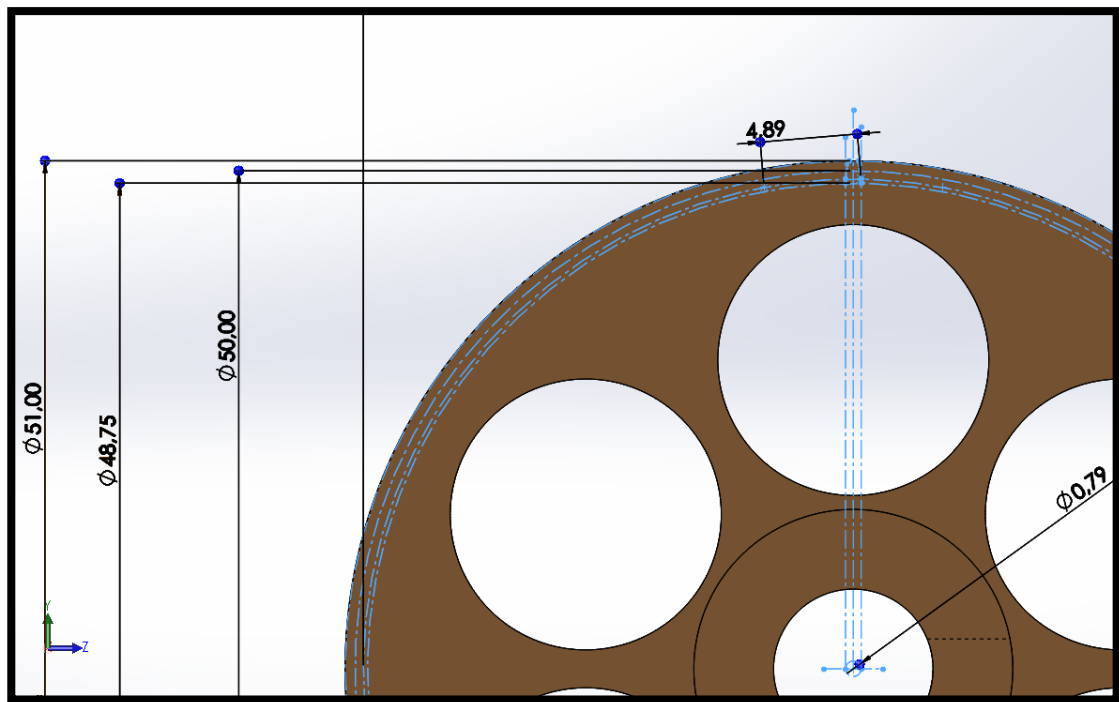


Figura 3-24. Trazado en SolidWorks de acuerdo al Odontografo de Grant.

Una vez tenemos sketch del diente, y con un posterior *Circular Pattern*, se ha podido dibujar el hueco que hay entre dientes. Luego, con la herramienta *Cut-Extrude*, se puede eliminar material de una pieza, a través de un sketch definido y cerrado.

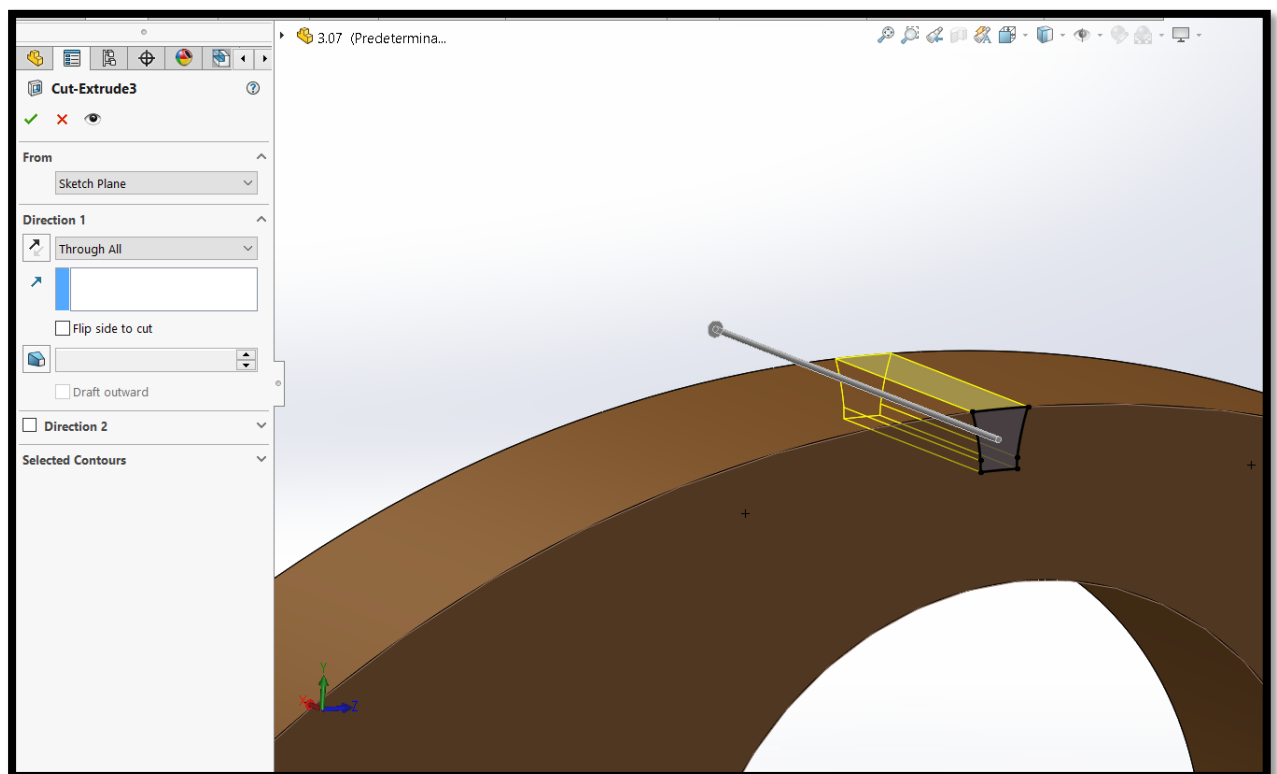


Figura 3-25. Herramienta *Cut-Extrude* para modelar el espacio entre dientes.

Finalmente, el perfil del engranaje queda como en la Figura 3-26.

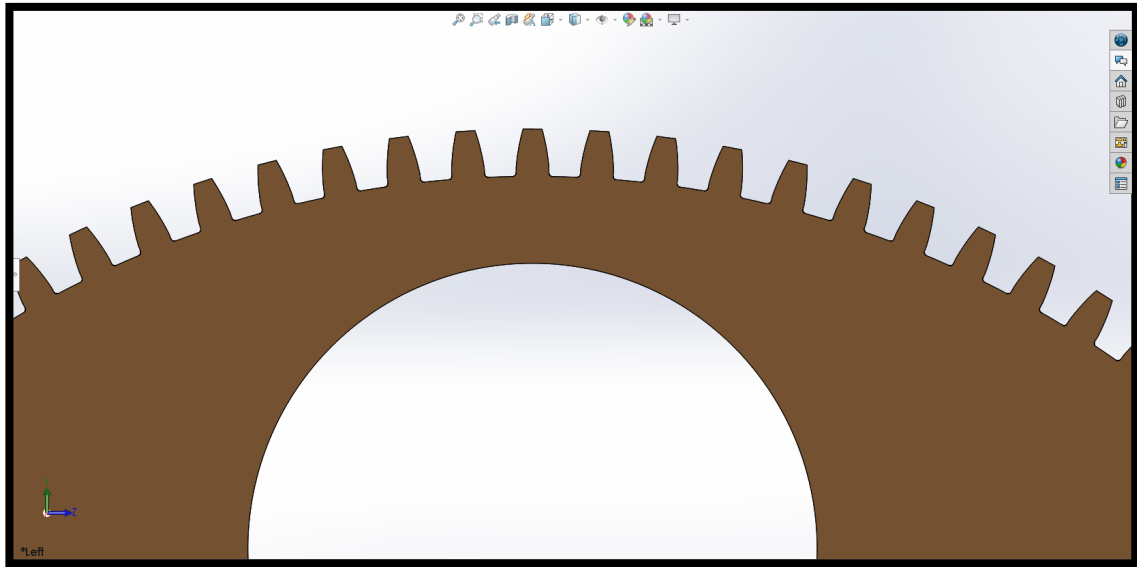


Figura 3-26. Perfil del engranaje de acuerdo al Odontógrafo de Grant.

A continuación, vamos a analizar la pieza pistón del motor de Stirling. Esta pieza resulta fundamental en cualquier motor debido a que su propósito es transferir la fuerza del gas en expansión en el cilindro al cigüeñal a través de un vástago de pistón y/o biela. En una bomba, la función se invierte y la fuerza se transfiere desde el cigüeñal al pistón con el fin de comprimir o expulsar el fluido en el cilindro. En algunos motores, el pistón también actúa como una válvula al cubrir y destapar los puertos del cilindro.

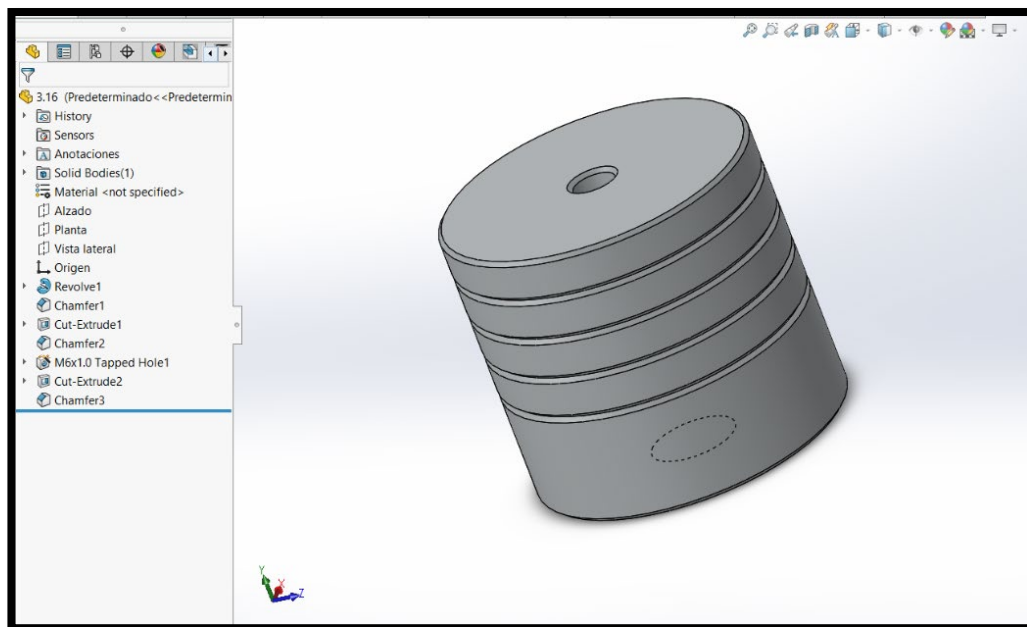


Figura 3-27. Modelado del pistón

Las herramientas utilizadas para la modelización de esta pieza son las siguientes: *Revolve*, *Chamfer*, *Cut-Extrude*, *Hole Wizard*. Debido a que la herramienta *Revolve* y *Cut-Extrude* ya han sido explicadas, nos centraremos más en la herramienta *Chamfer* y *Hole Wizard*.

1. Chamfer:

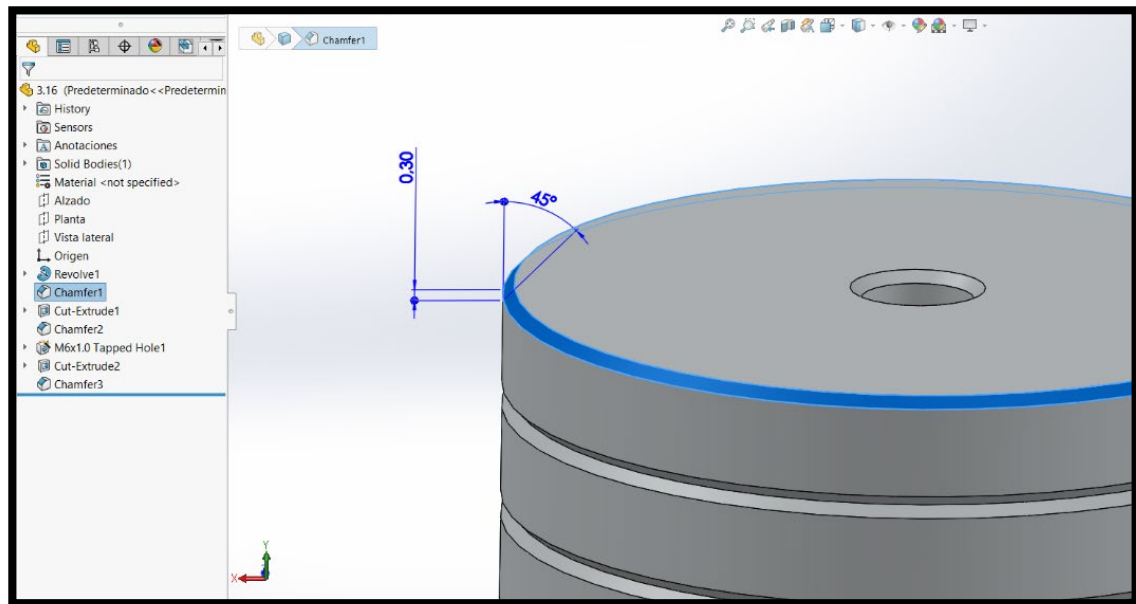


Figura 3-28. Operación *Chamfer*

2. Hole Wizard

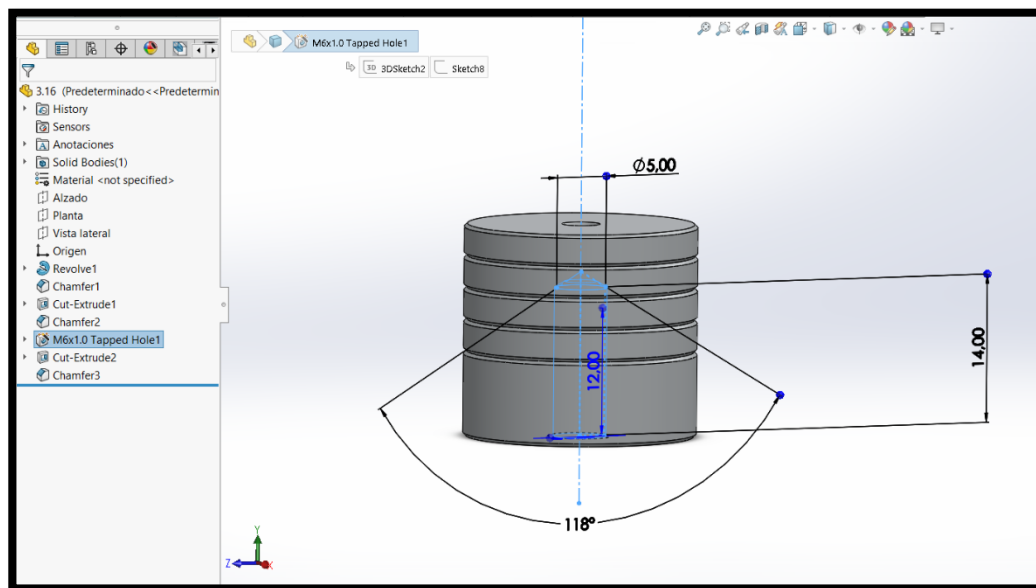


Figura 3-29. Operación *Hole Wizard*.

En este caso, se trata de un agujero con métrica M6x1.0. con una profundidad de 14 mm y una profundidad de superficie dentada de 12 mm.

Las siguientes piezas que vamos a ver de este subconjunto son las varillas. En este conjunto tenemos un total de 3 varillas diferentes y 5 en total que sirven de eje y de acompañamiento al pistón. La modelización de las varillas supone una tarea trivial ya que sólo se componen de ciertas herramientas básicas para su modelado. La herramienta más habitual usada para este tipo de piezas es *Extrude*. Posteriormente, para chaflanar los bordes, se utiliza habitualmente la herramienta *Chamfer*.

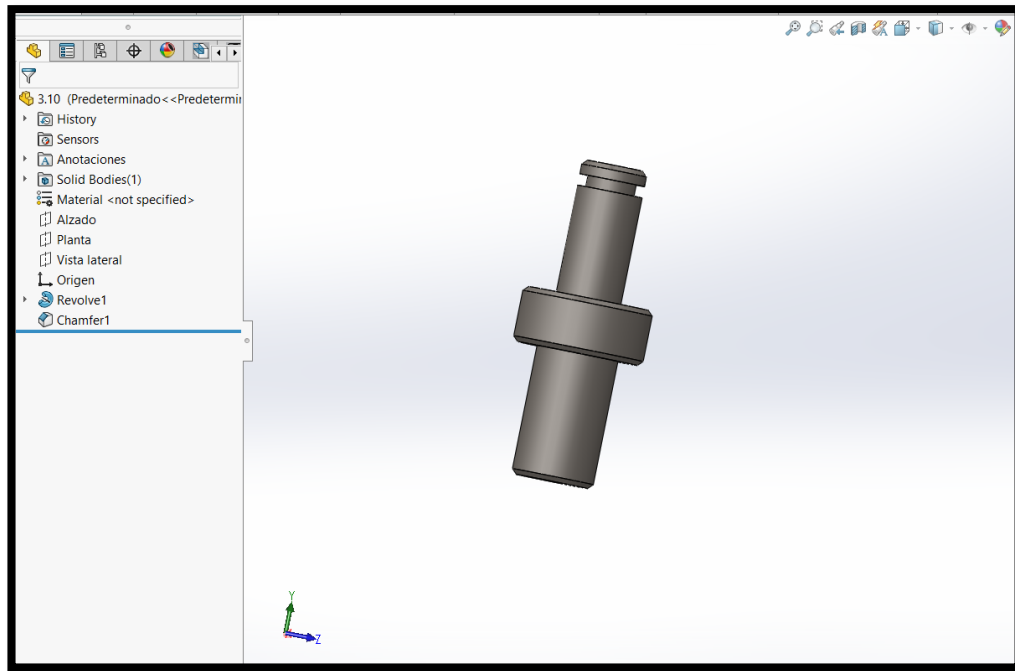
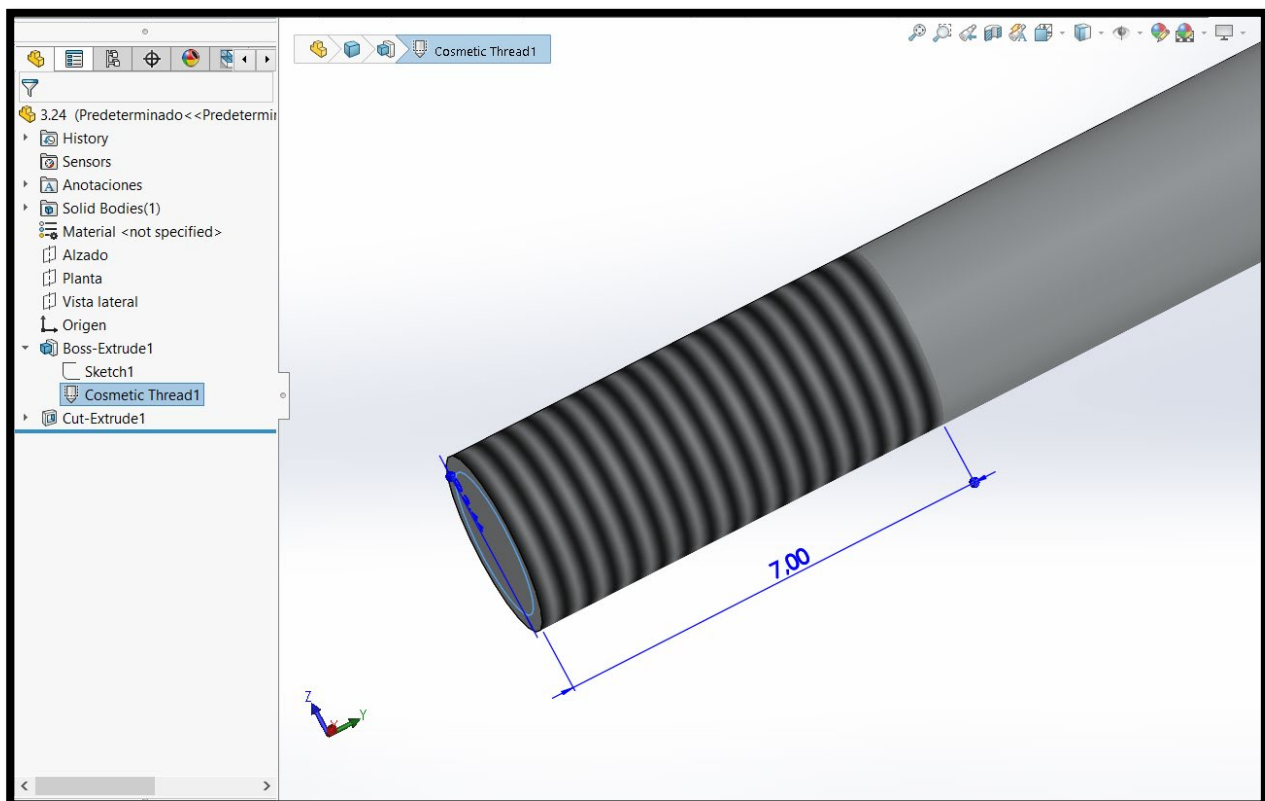


Figura 3-30. Modelado de la varilla.

Una herramienta que he utilizado para hacer ejes dentados es *Cosmetic-Thread*. Esta herramienta me ha servido para configurar a la varilla una métrica M3x0,5 de una manera bastante sencilla. Resulta muy útil y visual poder ver la varilla dentada con esa métrica.

Figura 3-31. Operación de *Cosmetic-Thread*

Para que muchas de estas varillas puedan girar con el mínimo rozamiento posible, se disponen de unos rodamientos que están situados en la brida de rodamiento. Esta brida a su vez se encuentra en la base del motor Stirling.

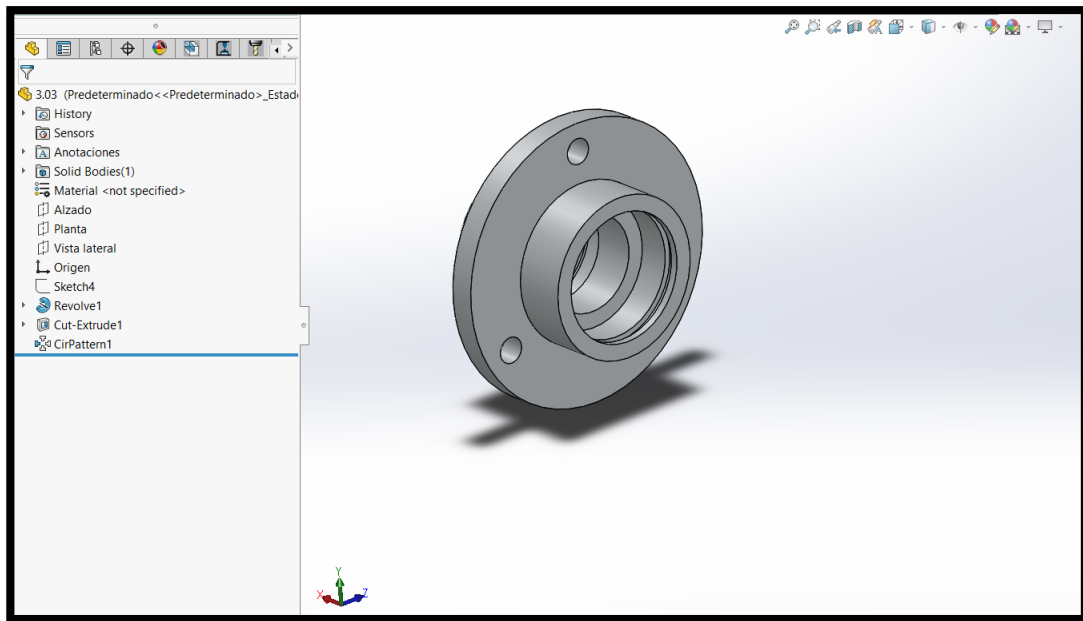


Figura 3-32. Modelado de la brida de rodamiento

En el interior de esta brida se encuentra el rodamiento el cual hace posible el giro de las varillas que se encuentran en el motor Stirling. Su modelado se basa en un *Revolve* y varios agujeros sin rosca con la operación *Cut-Extrude*.

Otra pieza muy importante utilizada en cualquier motor es el cigüeñal. Éste es el encargado de, aplicando el principio del mecanismo de biela-manivela, transformar el movimiento rectilíneo alternativo en circular uniforme y viceversa.

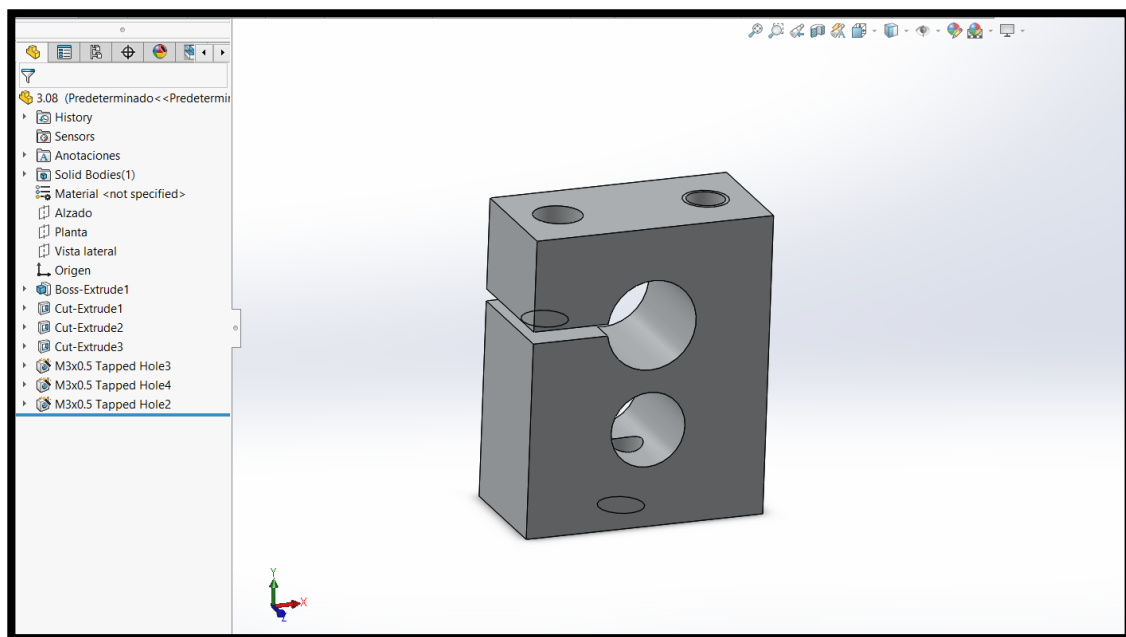


Figura 3-33. Modelado de la pieza cigüeñal

También se utiliza otra pieza que está justo encima de la anterior y ésta sirve como contrapeso, para poder darle mayor inercia al conjunto. Este contrapeso está modelado en acero.

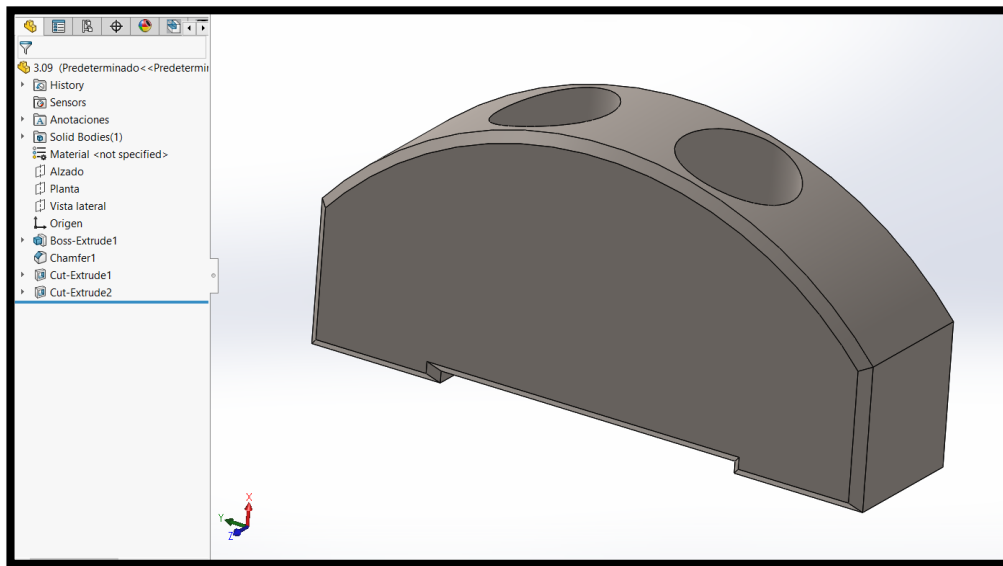


Figura 3-34. Modelado de la pieza contrapeso.

Otra pieza involucrada en el motor es la biela. Ésta, es un elemento de máquina, articulado para transmitir longitudinalmente movimiento entre dos partes de un mecanismo. Está sometida a esfuerzos de tracción y de compresión. El proceso de modelado de la biela consta de un *Boss-Extrude* y un *Fillet* para el redondeo de ciertas superficies.

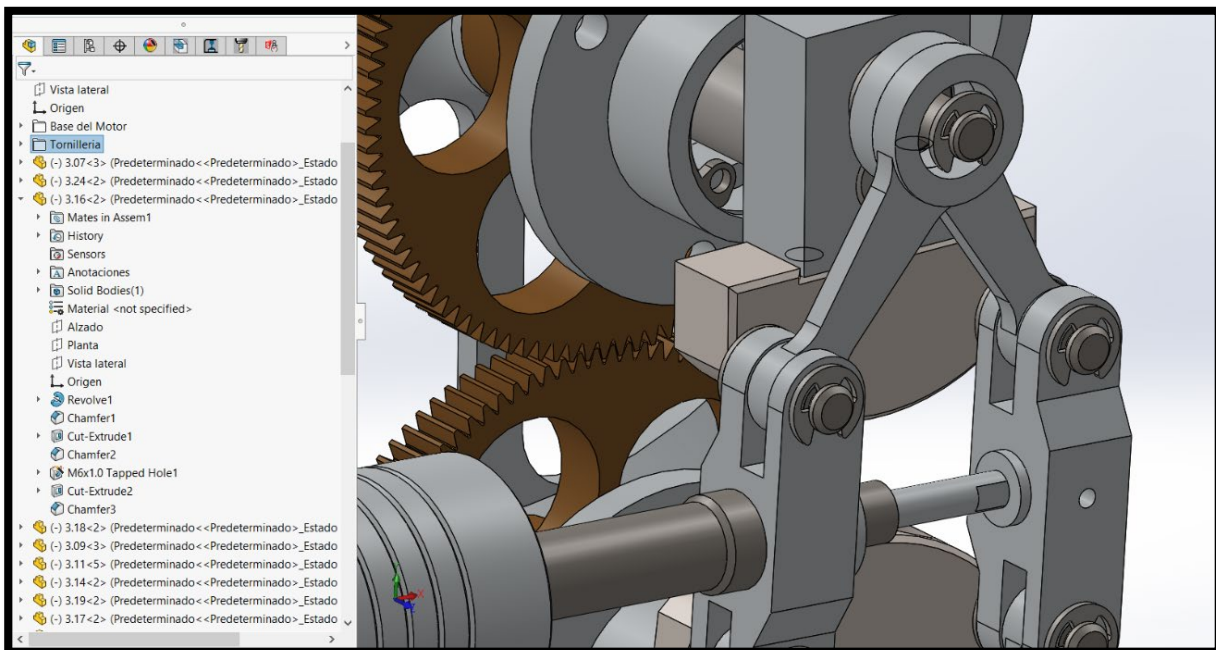


Figura 3-35. Pieza biela en el conjunto.

La secuencia de operaciones realizadas en la pieza Biela son las siguientes:

1. *Boss-Extrude*:

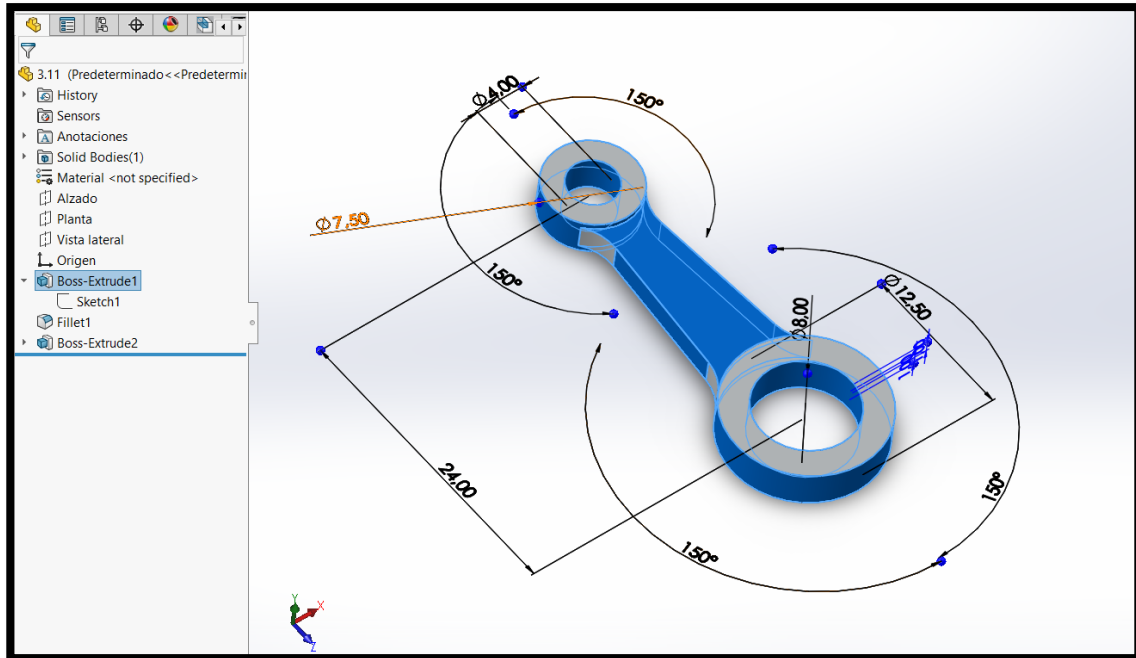


Figura 3-36. Operación *Boss-Extrude*

2. *Fillet*:

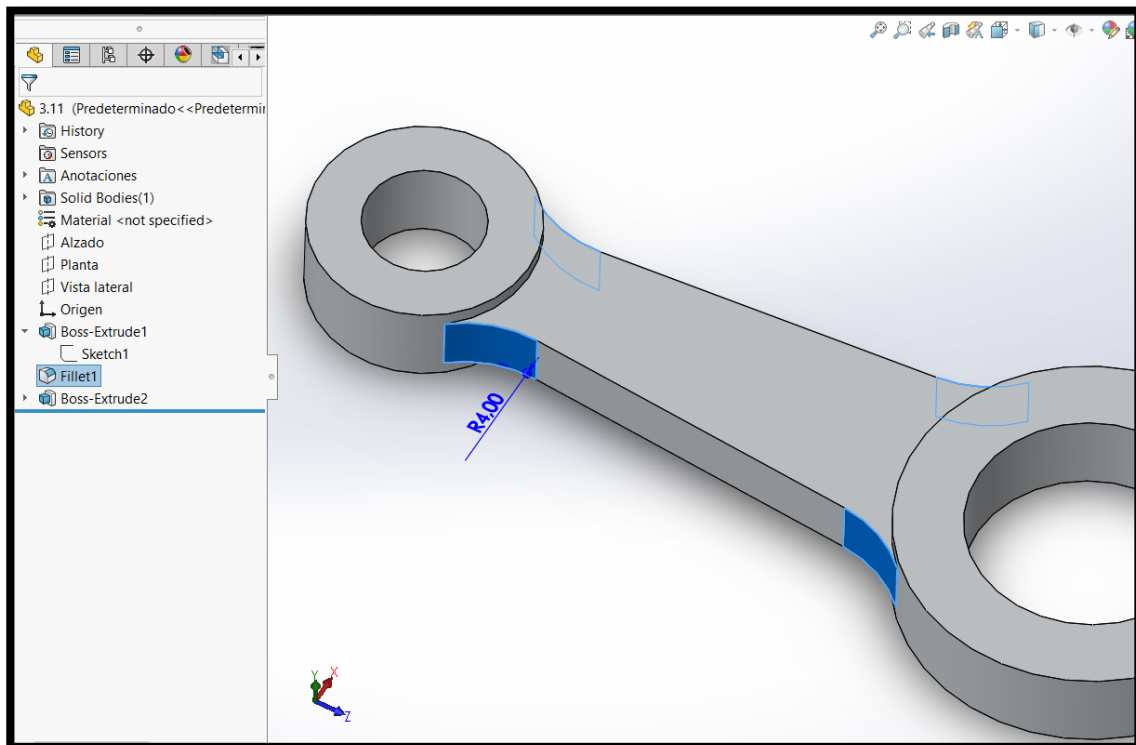


Figura 3-37. Operación *Fillet*.

3.4 Tornillería

Este subconjunto está formado por todos los tornillos roscados, rodamientos, anillos de seguridad y arandelas necesarias para atar al conjunto. Están modelados en acero, y aunque resultan una parte del conjunto olvidada, también desempeñan una función fundamental.

La primera pieza de la que hablaremos en este apartado es de los rodamientos de bolas. El rodamiento es un elemento mecánico que reduce la fricción entre un eje y las piezas conectadas a este por medio de una rodadura, que le sirve de apoyo y facilita su desplazamiento.

SolidWorks proporciona un módulo de tornillería, donde están guardados los modelos de todos los rodamientos, tuercas, tornillos roscados y arandelas, por lo que este subconjunto se ha podido realizar de una manera bastante trivial.

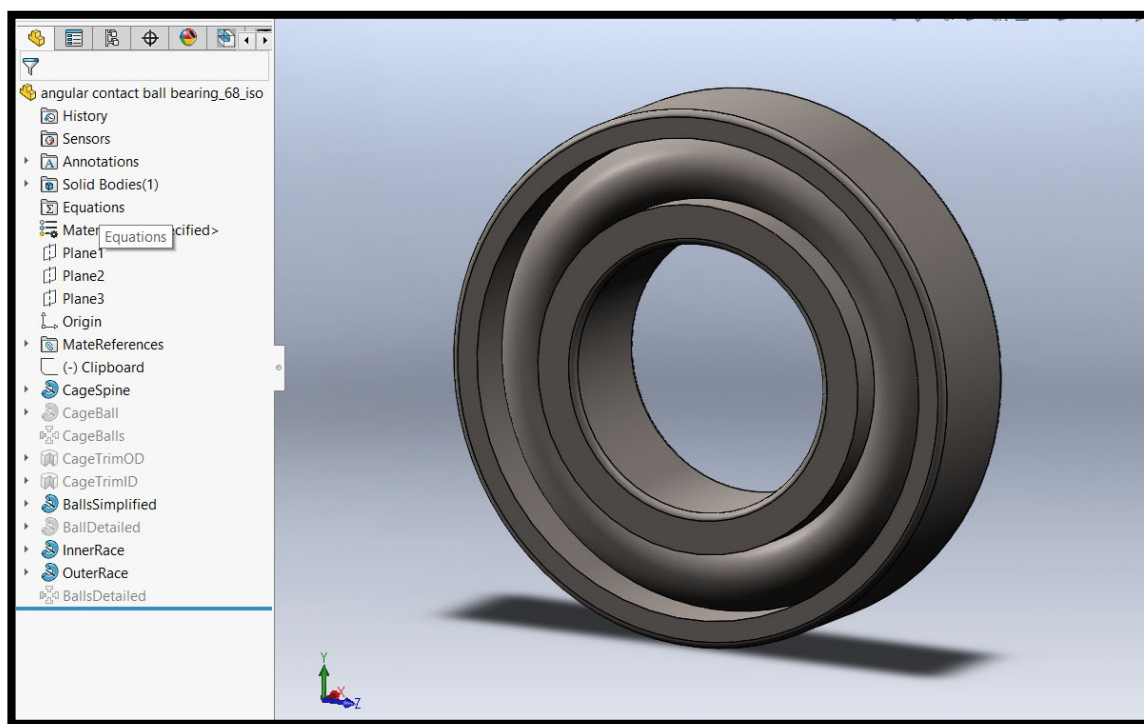


Figura 3-38. Modelado de un rodamiento de bolas

Debido a la semejanza que tienen todos los tornillos, se mostrará como ejemplo el modelado de un tornillo roscado que servirá como modelo para todos los tornillos roscados del conjunto. El tornillo roscado que se escogerá como ejemplo es el de métrica M4x3mm.

Las operaciones que se han seguido para el modelado de los tornillos son las mismas que se han usado para el modelado de las piezas de los apartados anteriores, por lo que no se hace necesario explicar las operaciones que se han utilizado para el modelado de los tornillos. Las operaciones que se han seguido para el modelado fueron las siguientes.

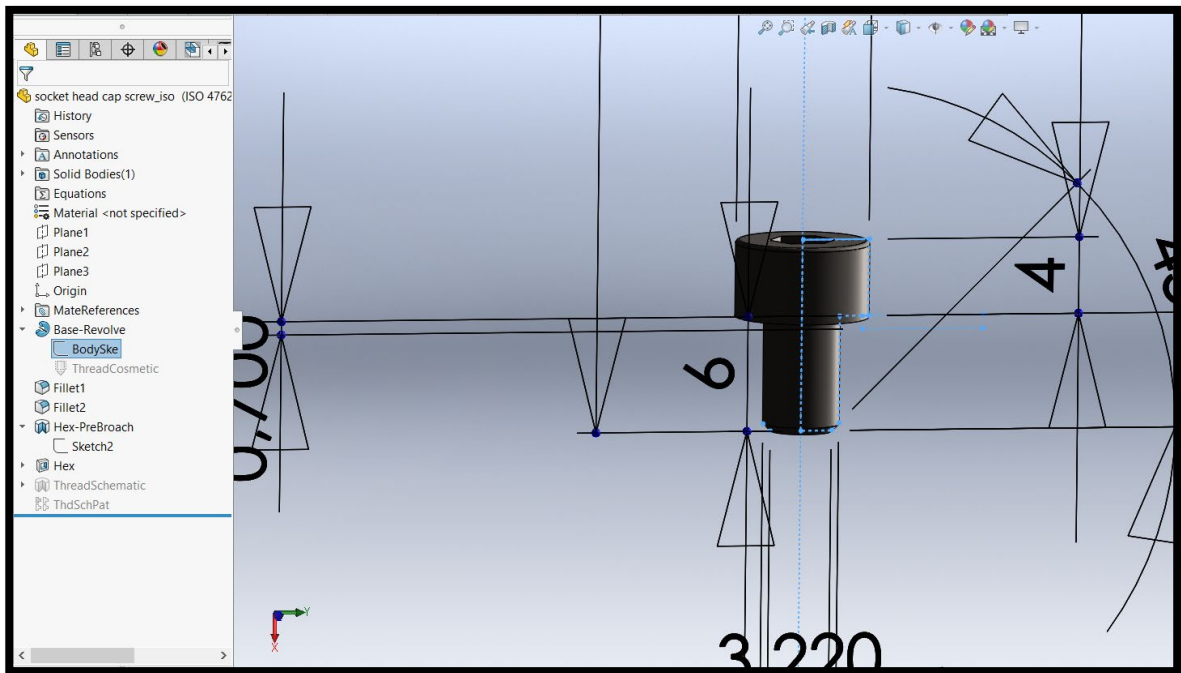
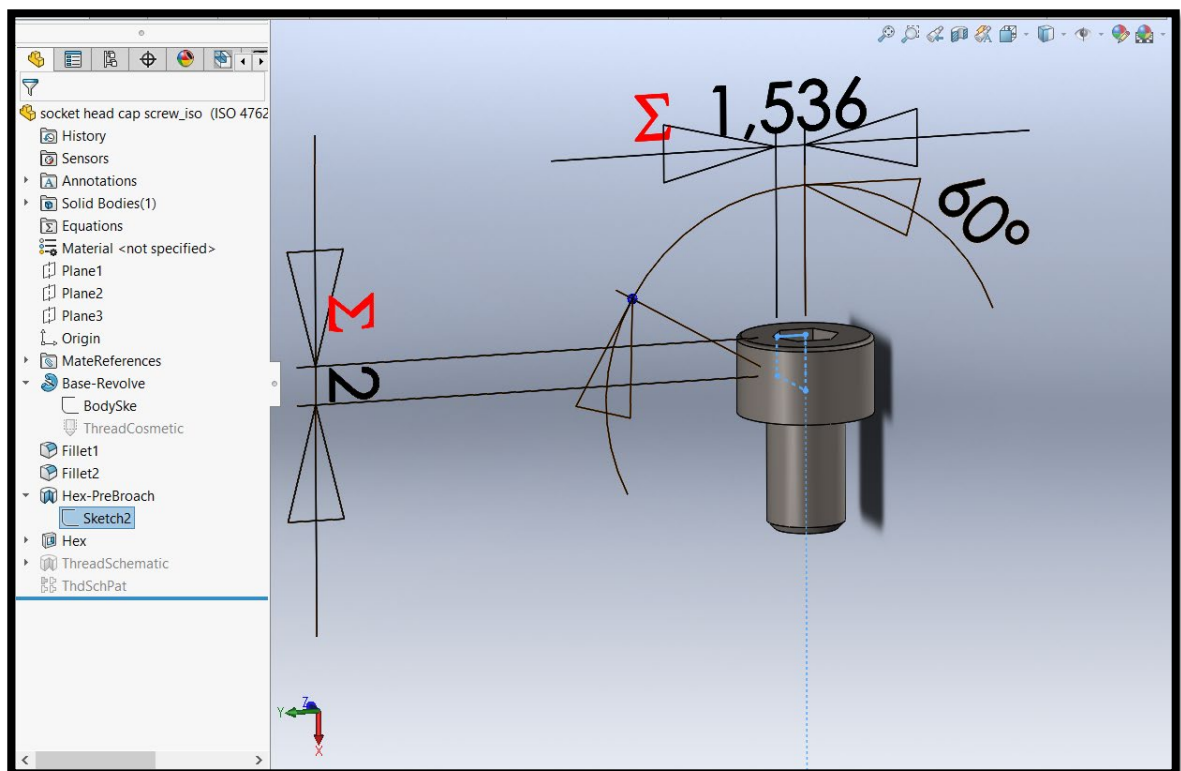
1. *Revolve*:

Figura 3-39. Operación Revolve

2. *Revolved-cut*Figura 3-40. Operación *Revolved-cut*

3. *Cut-Extrude*:

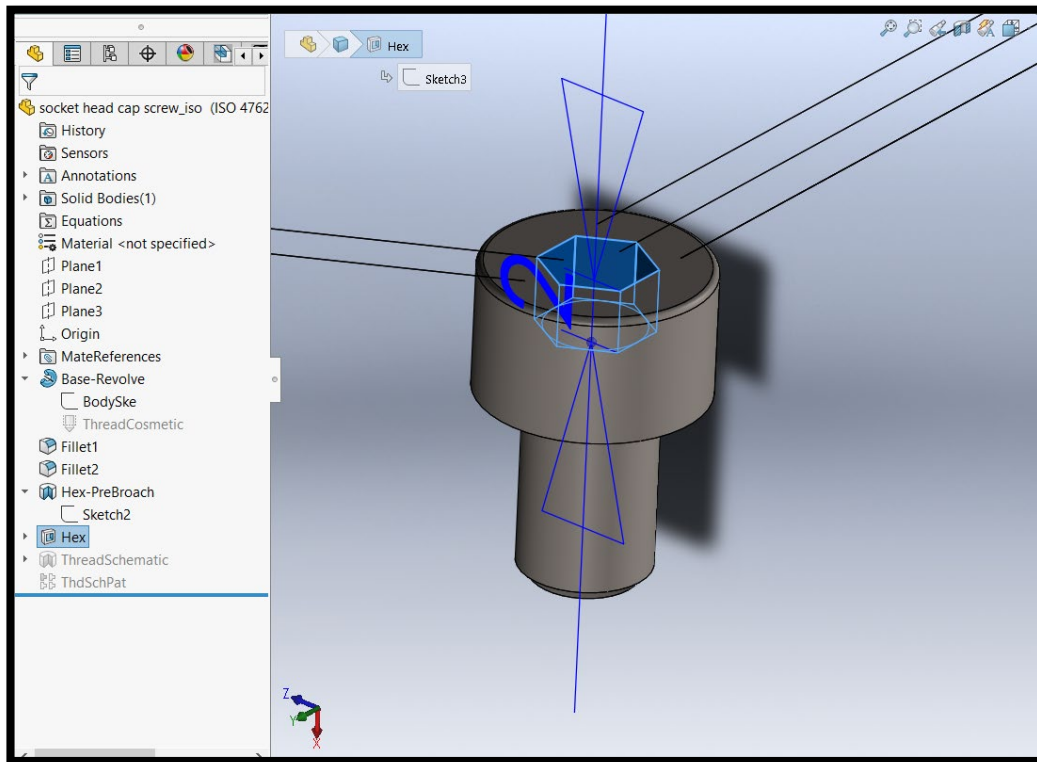


Figura 3-41. Operación *Cut-extrude*

Respecto a las arandelas, se han modelado según la norma DIN. Éstas son los estándares técnicos para el aseguramiento de la calidad en productos industriales y científicos en Alemania.

Concretamente, la normativa DIN 6799 es la que recoge las medidas de la arandela usada en este conjunto.

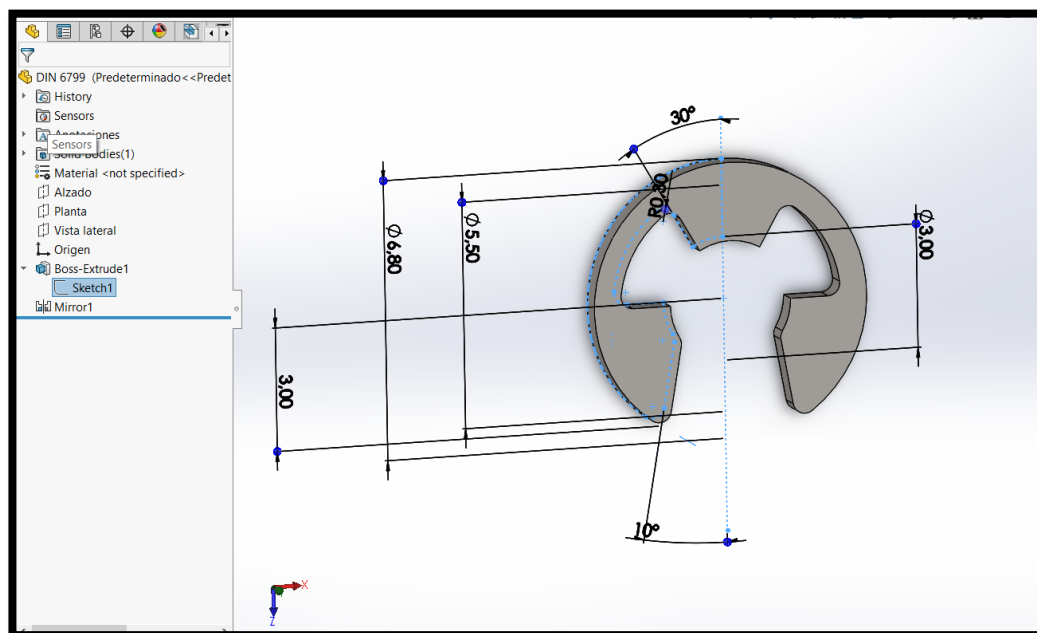


Figura 3-42. Operación *Boss-Extrude*

Para la siguiente arandela, se ha usado la norma DIN 472, cuyo modelado es bastante similar a la anterior.

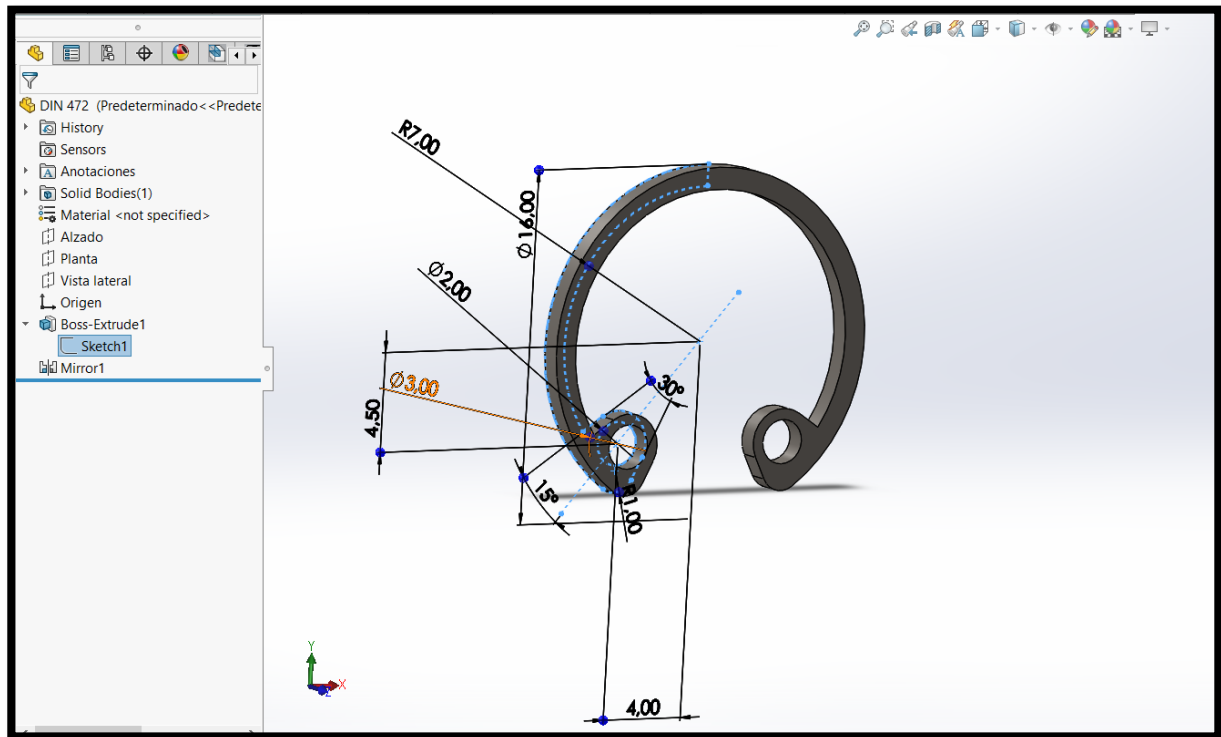


Figura 3-43. Operación *Boss-Extrude*

4 ENSAMBLAJE DEL MOTOR

En este capítulo se mostrará el resultado final del ensamblaje de los subconjuntos del apartado anterior y se hará una comparación con el ensamblaje de los planos.

En primer lugar, cabe destacar que, algunas de las piezas del conjunto no se encontraban en los planos, tales como las piezas de tornillería ya mencionadas en capítulos anteriores. Además, algunas medidas de piezas no se encontraban recogidas en los planos, por lo que se han tomado medidas aproximadas en algunas de las piezas. El acero ha sido el material que más se ha utilizado para el modelado de las piezas del conjunto, aunque también se ha utilizado aluminio, bronce y cobre para el modelado de algunas piezas.

La herramienta que se ha utilizado para la unión de las piezas ha sido, *Mate*. Con esta herramienta, se han podido realizar todas las relaciones geométricas de posición que han hecho que todo el conjunto sea ensamblado.

Como se ha explicado en capítulos anteriores, el conjunto se ha dividido en subconjuntos compuesto por piezas a su vez. El primer subconjunto es el llamado *Base del motor*

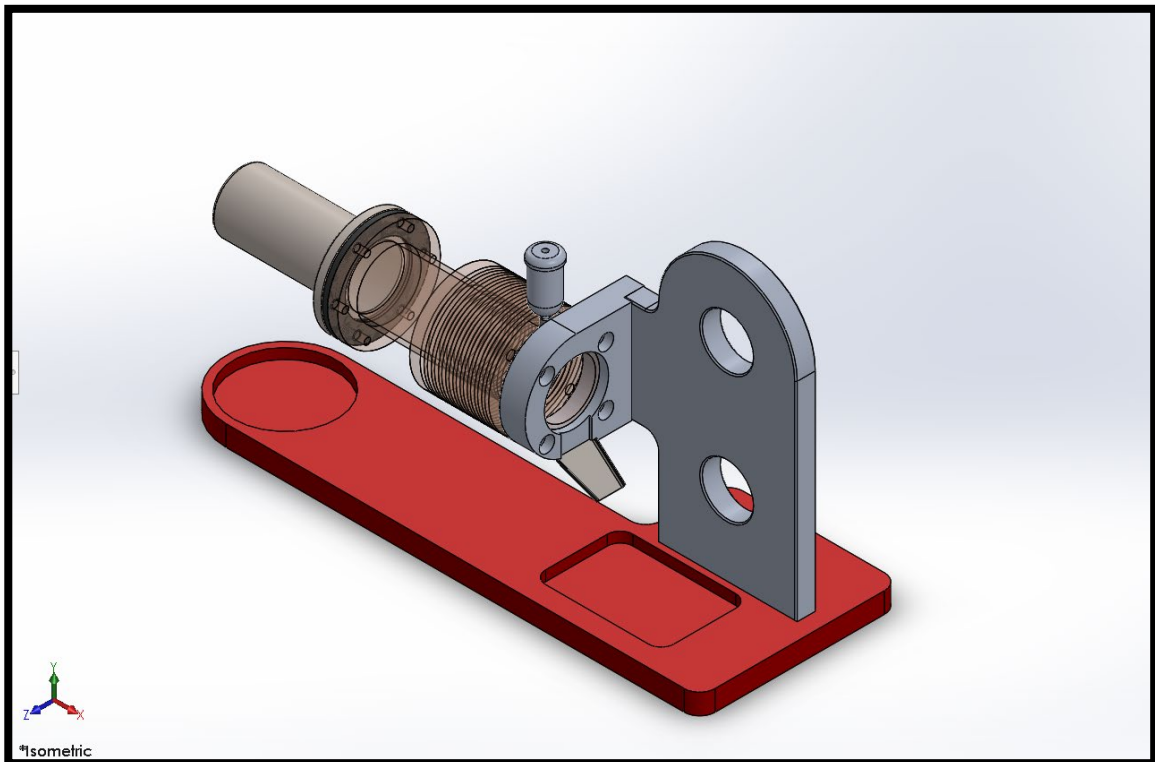


Figura 4-1. Subconjunto *Base del motor*.

El segundo subconjunto es el llamado *Piezas móviles*, conformado por todas las piezas que están involucradas en la cinemática del motor Stirling. El tercer subconjunto, es el llamado Tornillería, este subconjunto lo conforman todos los tornillos, arillas, tuercas, y rodamientos que conectan al subconjunto Base al de partes móviles del motor Stirling.

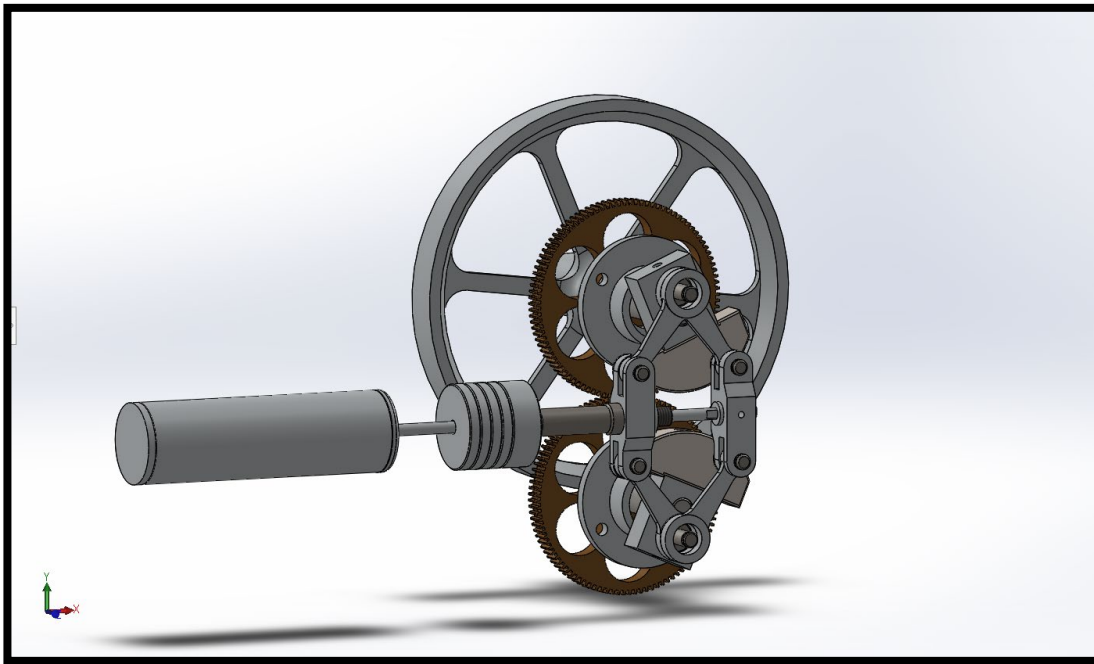


Figura 4-2. Subconjunto *Piezas Móviles* del motor Stirling

Las relaciones geométricas en la función *Mate* que se han usado para conformar este ensamblaje han sido: *Concentric*, *Coincident*, *Paralel* y *Tangent*. Con estas herramientas se han podido establecer las relaciones de posición necesarias para poder realizar el ensamblaje y posteriormente la recreación cinemática.

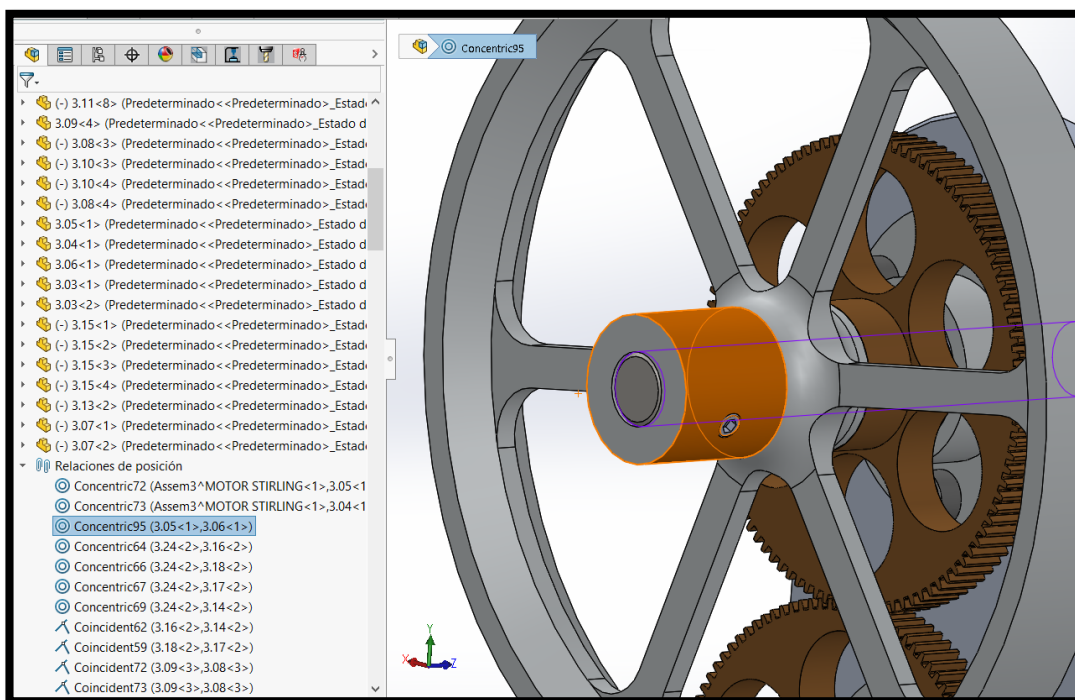


Figura 4-3. Relación geométrica *Concentric* entre dos circunferencias.

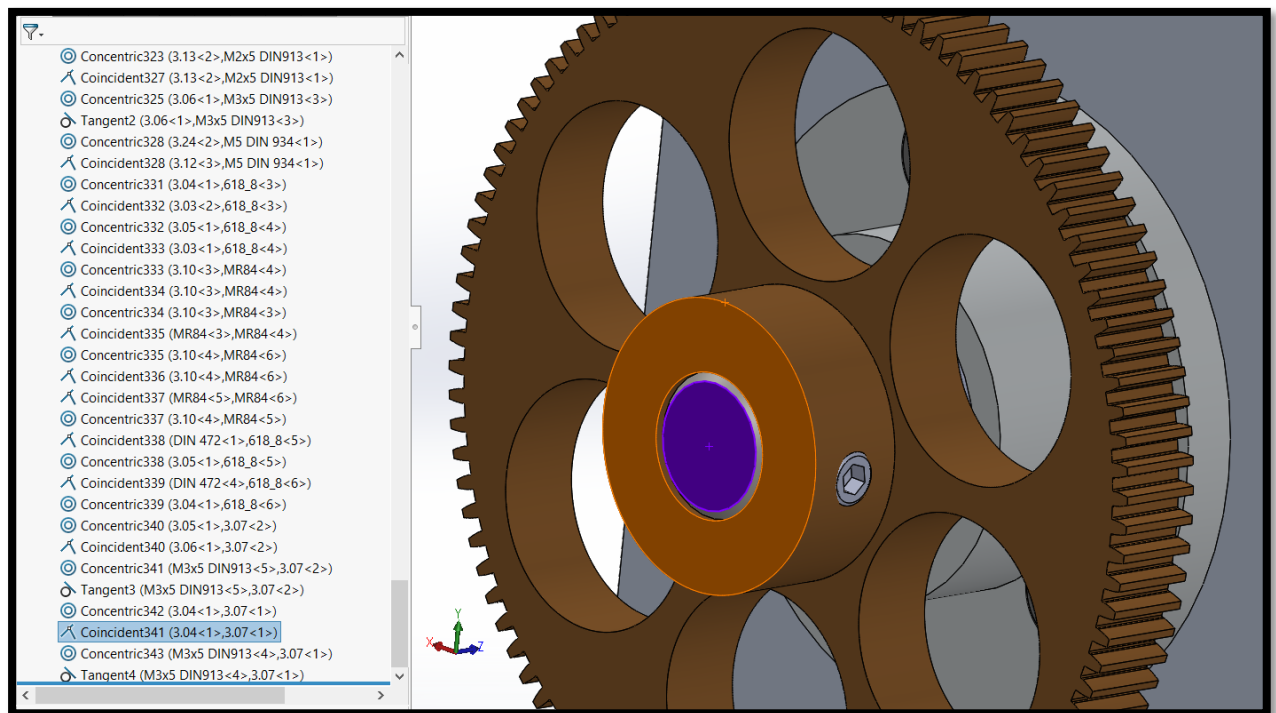


Figura 4-4. Relación geométrica *Coincident* entre dos superficies

A continuación, se irá mostrando todas las ilustraciones del conjunto completo (Base+Partes móviles + Tornillería), además de algunas vistas explosionadas para poder ver la totalidad de las piezas involucradas en el conjunto motor Stirling.

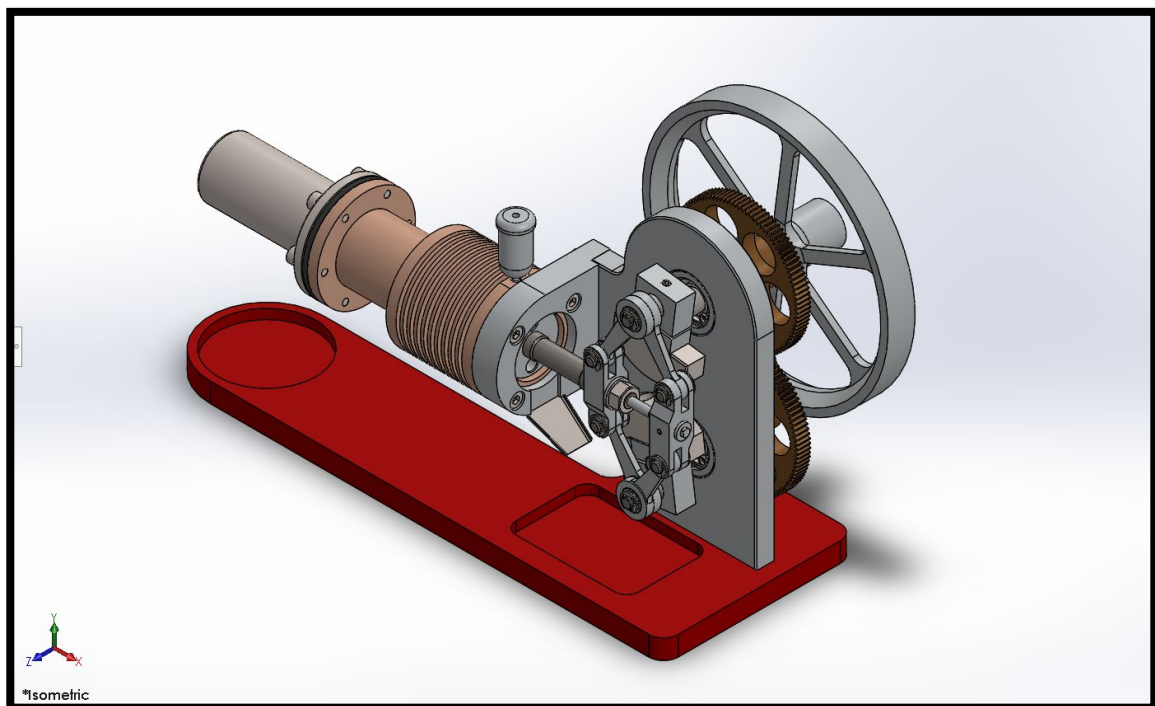


Figura 4-5. Isométrico del conjunto Motor Stirling.

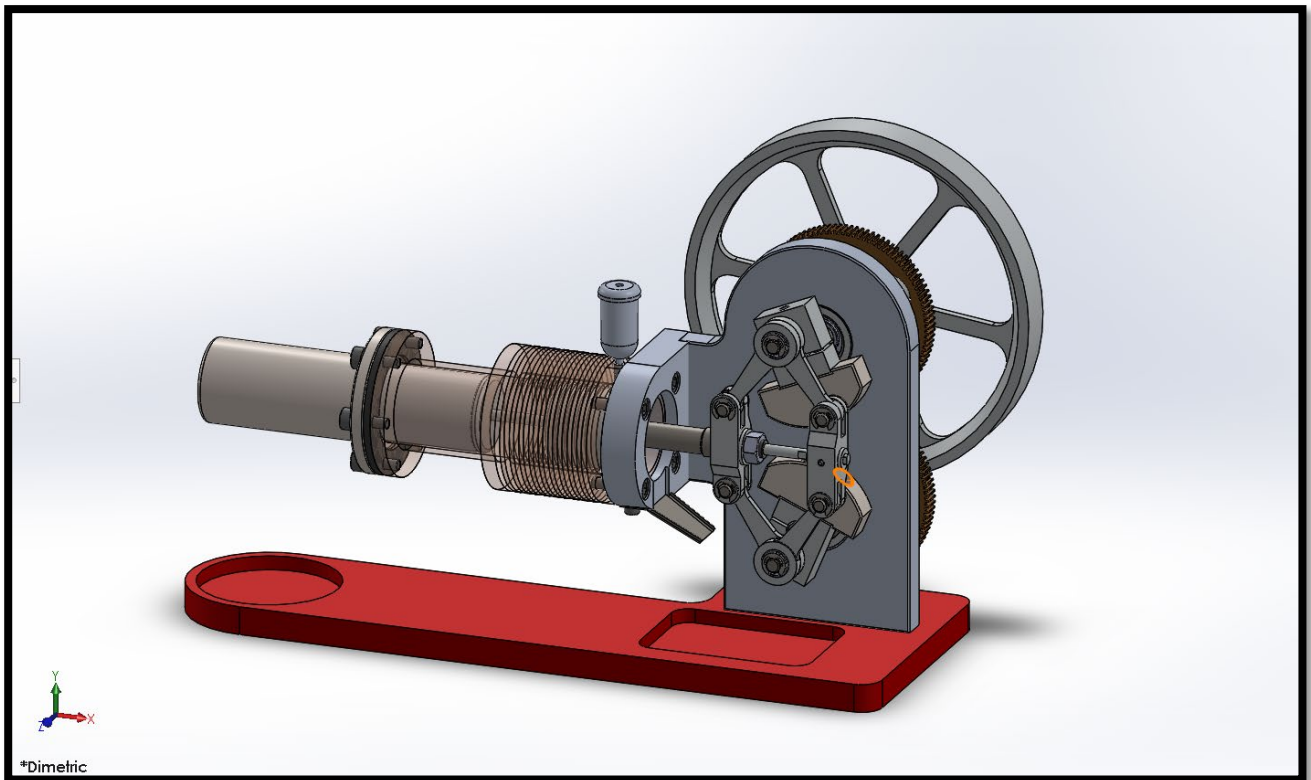


Figura 4-6. Vista dimétrica del conjunto.

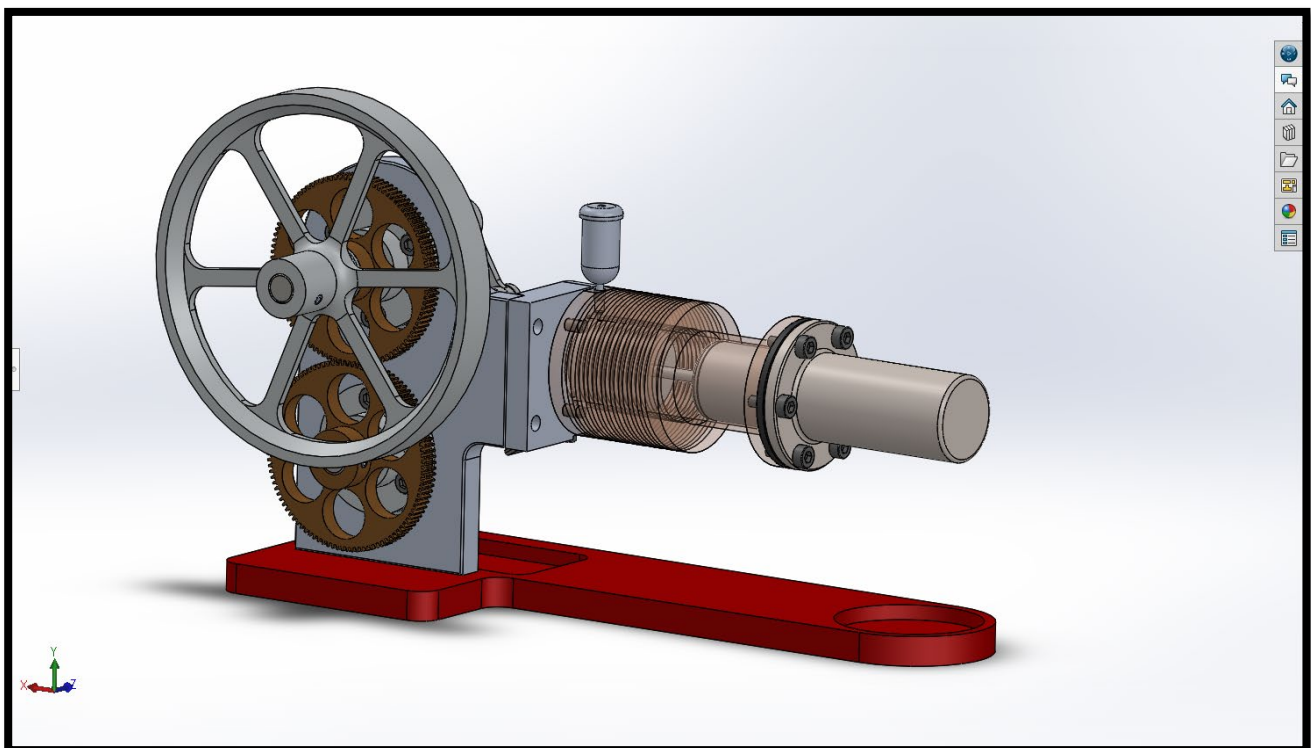


Figura 4-7. Segundo isométrico del Motor Stirling.

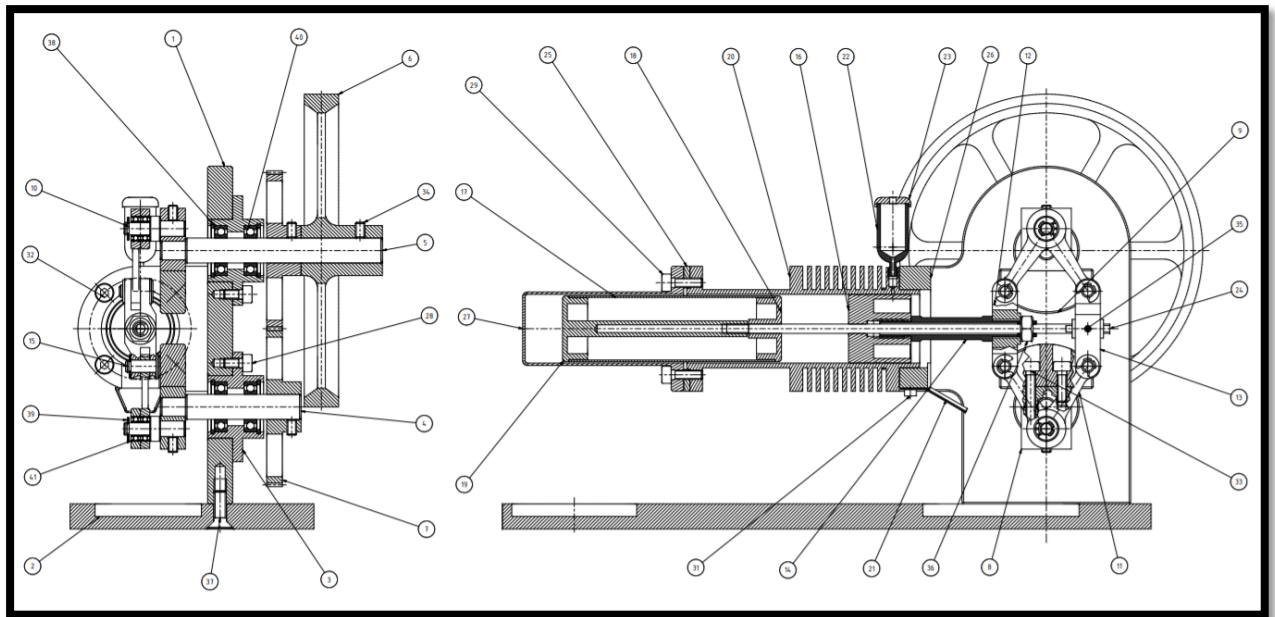


Figura 4-8. Vista de perfil y alzado del conjunto.

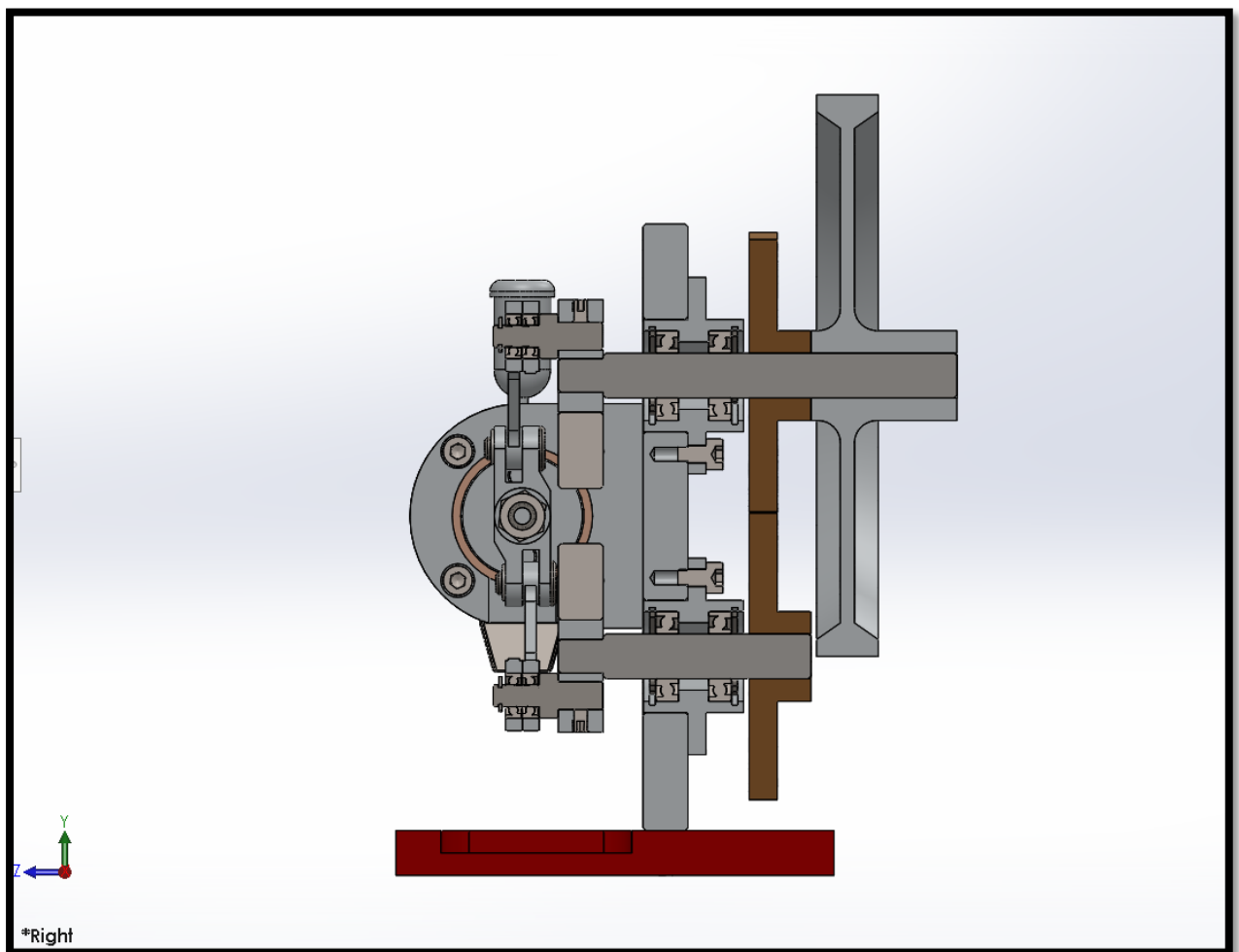


Figura 4-9. Vista de perfil del conjunto en SolidWorks.

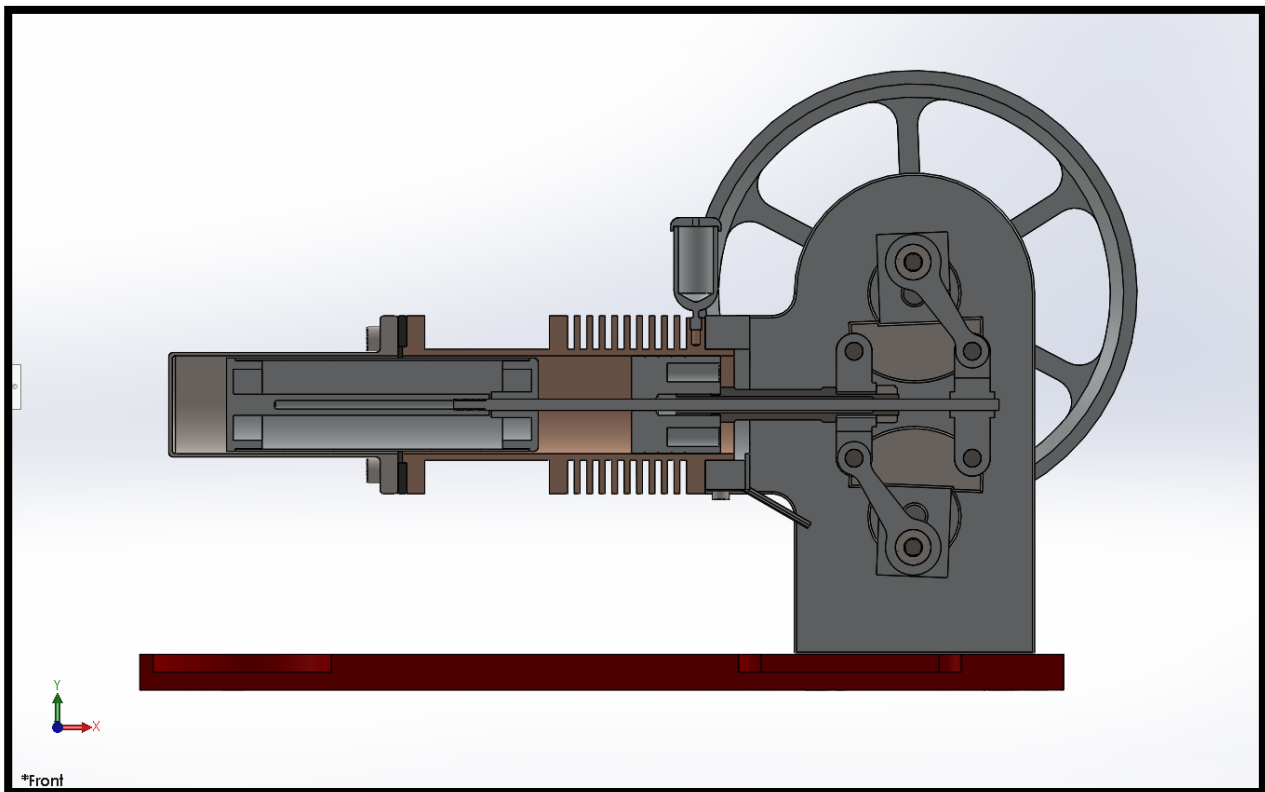


Figura 4-10. Vista de alzado del conjunto en SolidWorks.

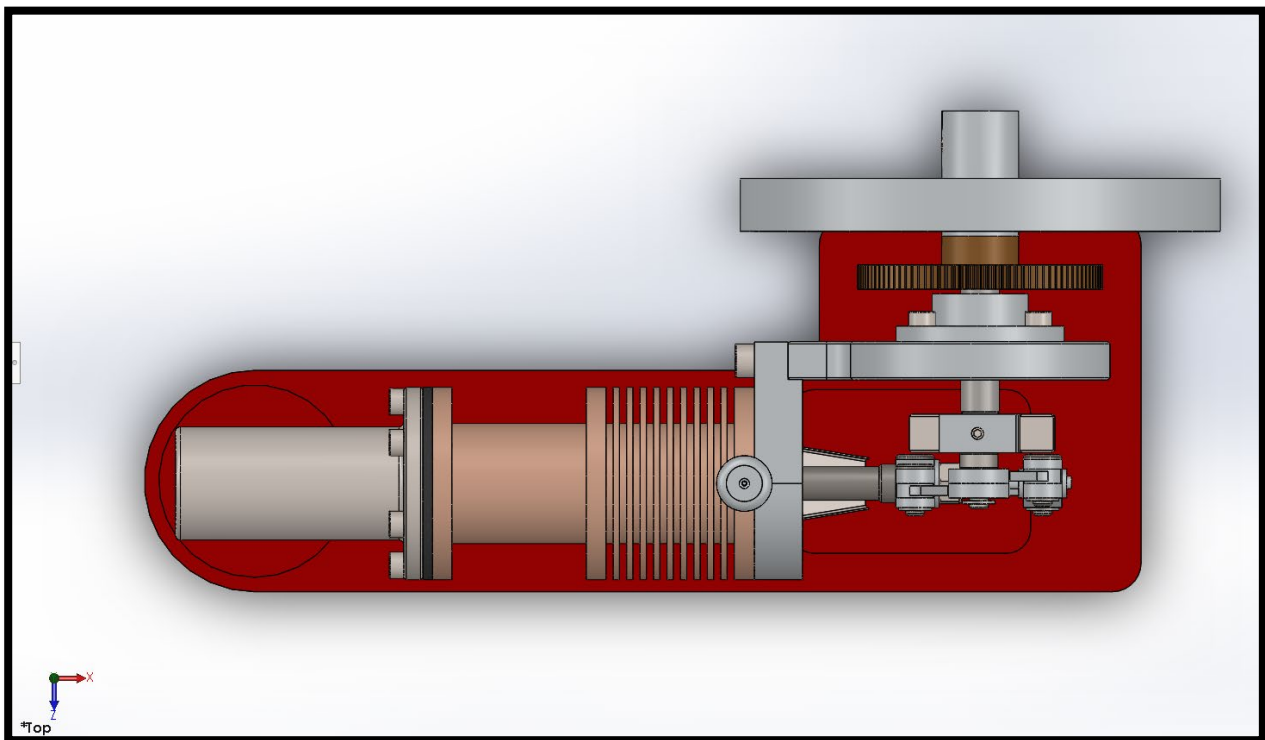


Figura 4-11. Vista de planta del conjunto en SolidWorks

5 FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR

El motor Stirling funciona a partir de un ciclo cerrado de un gas, el cual suele ser aire, helio o hidrógeno. En el motor se generan dos focos, el frío y el caliente. El foco caliente se encarga de subir la temperatura y presión, luego este gas caliente y a presión se pasa al foco frío. En el foco frío se aprovecha la presión generada en el desplazador para generar potencia, la consecuencia es una bajada de la presión. Como tenemos que calentar de nuevo el gas para subir la presión el gas también se enfría para volverlo a calentar. Una vez se ha aprovechado la presión, el gas se envía al desplazador de nuevo [28].

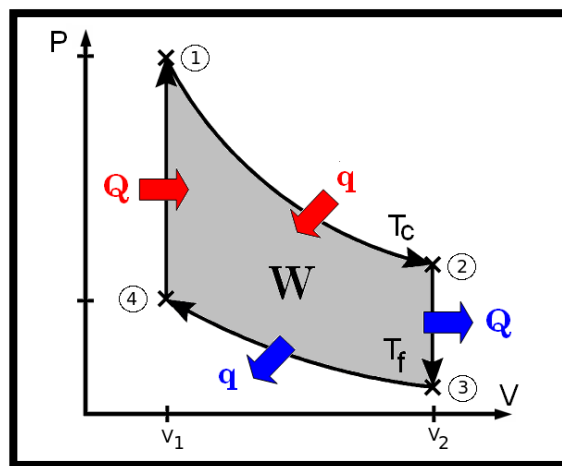


Figura 5-1. Ciclo termodinámico del motor Stirling [29]

A continuación, se explicará el proceso de funcionamiento paso a paso.

En la siguiente imagen, podemos ver que disponemos de una fuente de calor en el borde del cilindro, que hace que caliente el gas del interior. Como podemos observar en el diagrama de la imagen superior, tenemos un aumento de calor del gas a volumen constante, por tanto, un aumento de la presión. (4-1).

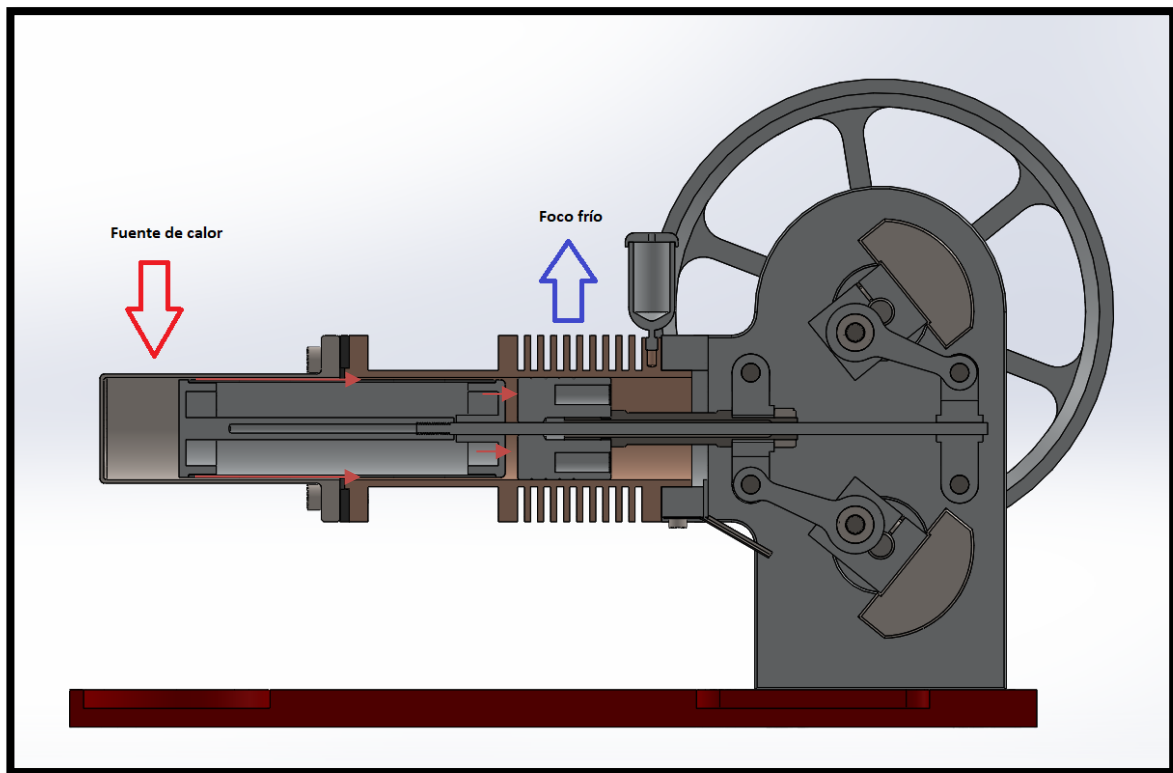


Figura 5-2. Representación de la fase de aumento de calor y presión en el cilindro (4-1).

Este aumento de presión ejercido por la expansión del gas, lleva a mover horizontalmente al segundo pistón, por lo que el volumen aumenta y disminuye la presión del gas. Este proceso se lleva a temperatura constante.

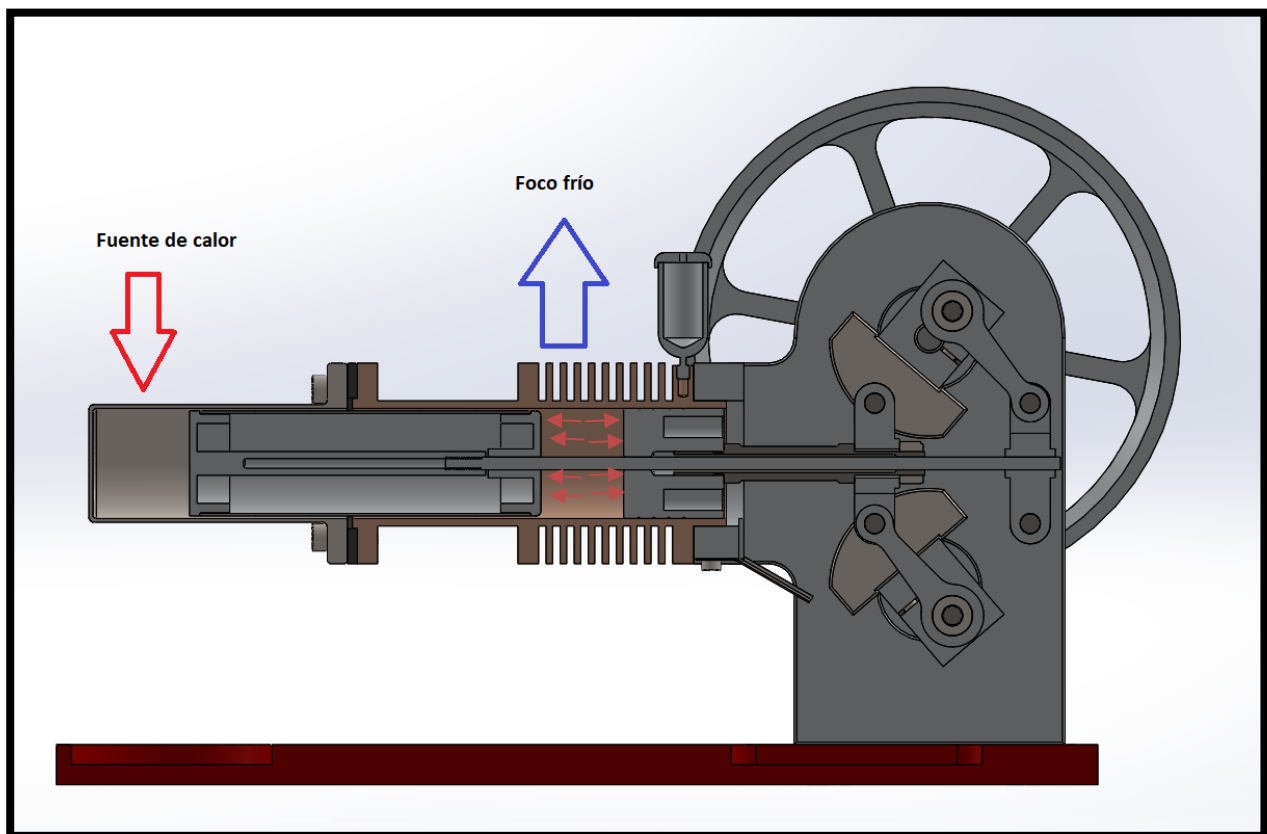


Figura 5-3. Expansión del gas a temperatura constante (1-2).

En este proceso, con la ayuda de las aletas del segundo cilindro, el calor del gas disminuye, por lo que el gas se contrae y la presión de este disminuye a volumen constante.

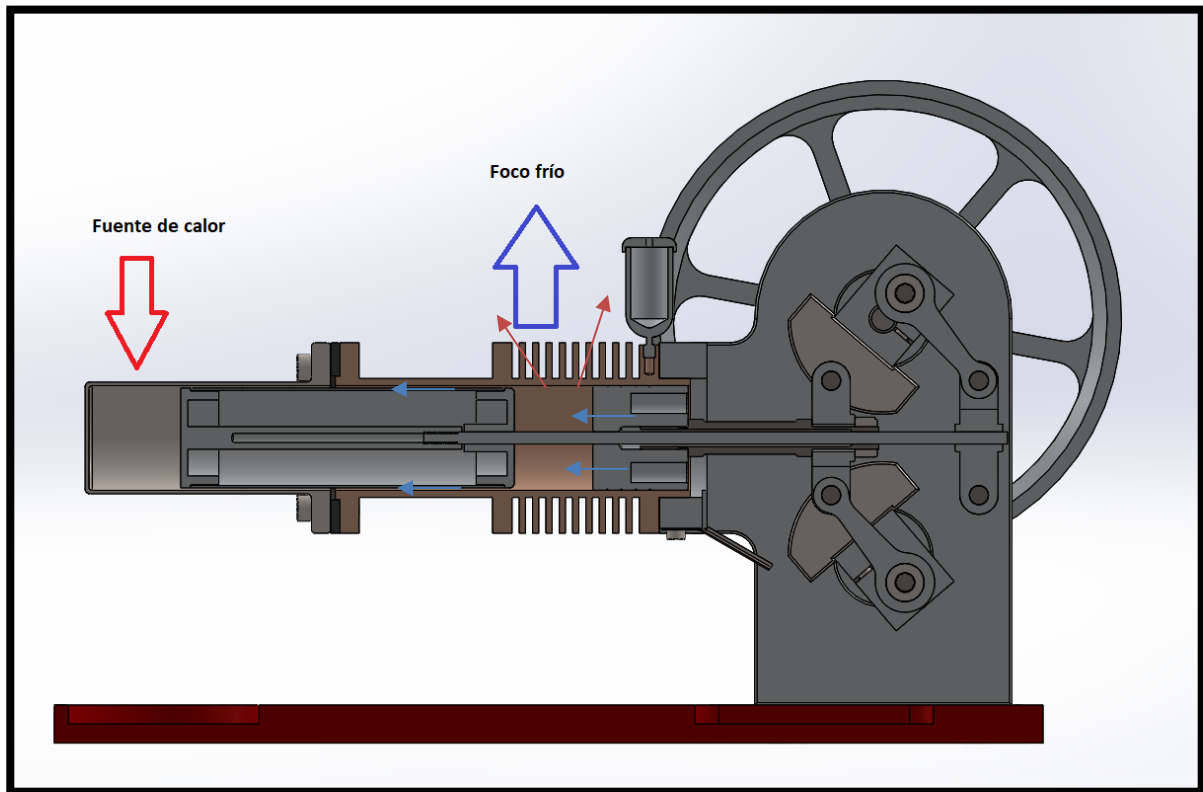


Figura 5-4. Disipación del calor en el segundo cilindro y disminución de la presión (2-3)

Al enfriarse el gas, este se contrae, y debido a la inercia del volante, hace que el cilindro se contraiga y se complete el ciclo. El volumen disminuye a temperatura constante.

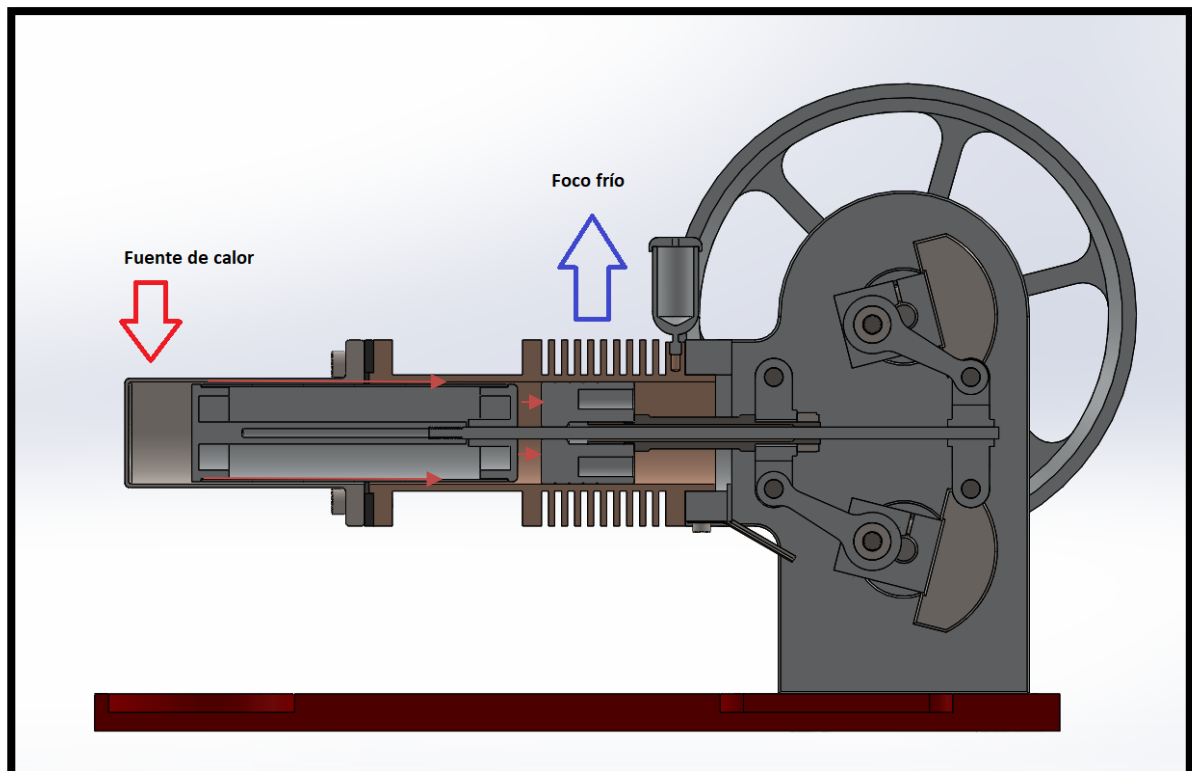


Figura 5-5. Aumento de la presión y disminución del volumen (3-4)

5.1 Rendimiento del ciclo de Stirling

Para analizar el rendimiento de cualquier ciclo termodinámico, siempre se suele comparar con el ciclo de Carnot equivalente, debido a que este, representa el ciclo termodinámico ideal [30].

El ciclo del motor Stirling es un ciclo termodinámico regenerativo cerrado, con expansión cíclica y compresión del fluido de trabajo a diversas temperaturas [30].

El motor Stirling es uno de los ciclos termodinámicos que más se acerca al máximo rendimiento de Carnot, aunque en la realidad el rozamiento del fluido con todos los elementos y las irreversibilidades de los procesos, hacen que el rendimiento decaiga en la realidad.

La limitación de este tipo de motor es que trabaja mejor a unas velocidades bajas. Esto se debe al efecto de calentar y enfriar el fluido de trabajo. Si el gas pasa muy rápido por los focos frío y caliente, apenas hay intercambio y decae el rendimiento, ya que no funciona en un régimen que le permita hacer bien las transferencias de calor. Recordando que la transferencia de calor es un proceso lento en este tipo máquina [30].

Otro factor que afecta al rendimiento de estas máquinas son los volúmenes muertos que hay en sistema. Un volumen muerto, no genera potencia y no pasa por todos los estados del ciclo. Si suponemos un sistema ideal sin volúmenes muertos, en el que se entrega una cantidad de calor, se obtiene una potencia y se extrae otra cantidad de energía calorífica determinada. Si añadimos los volúmenes muertos a este sistema y se fija el calor de entrada y de salida como en el ejemplo anterior, la potencia que entregará el fluido será menor. Aunque haya más masa en el sistema, como esta no realiza todo el ciclo, se pierde energía manteniendo frío o caliente el gas. La mejora para estos motores sería disminuir al mínimo estos volúmenes muertos. Pero a su vez son necesarios para el buen funcionamiento del sistema. Estos permiten que no haya colisiones entre los distintos elementos que conforman el sistema, incluso se utilizan para mejorar el funcionamiento de un sistema. Si en este volumen muerto se aprovecha a instalar un regenerador, hará que la potencia calorífica disminuya.

6 RECREACIÓN VIRTUAL DEL MOTOR

En este apartado se va a realizar una simulación y un posterior análisis cinemático al conjunto motor Stirling. SolidWorks dispone de una herramienta para realizar la simulación cinemática de cualquier conjunto. Esta herramienta es la llamada *SolidWorks Motion*. Con ella se ha podido realizar una recreación virtual del motor, pudiéndose observar en un posterior video el movimiento de todas las piezas del conjunto.

Resulta fundamental realizar un buen ensamblaje de cualquier conjunto para realizar la simulación cinemática correctamente, debido a que todas las piezas que están involucradas en el movimiento están conectadas entre sí haciendo que el sistema disponga de un solo grado de libertad.

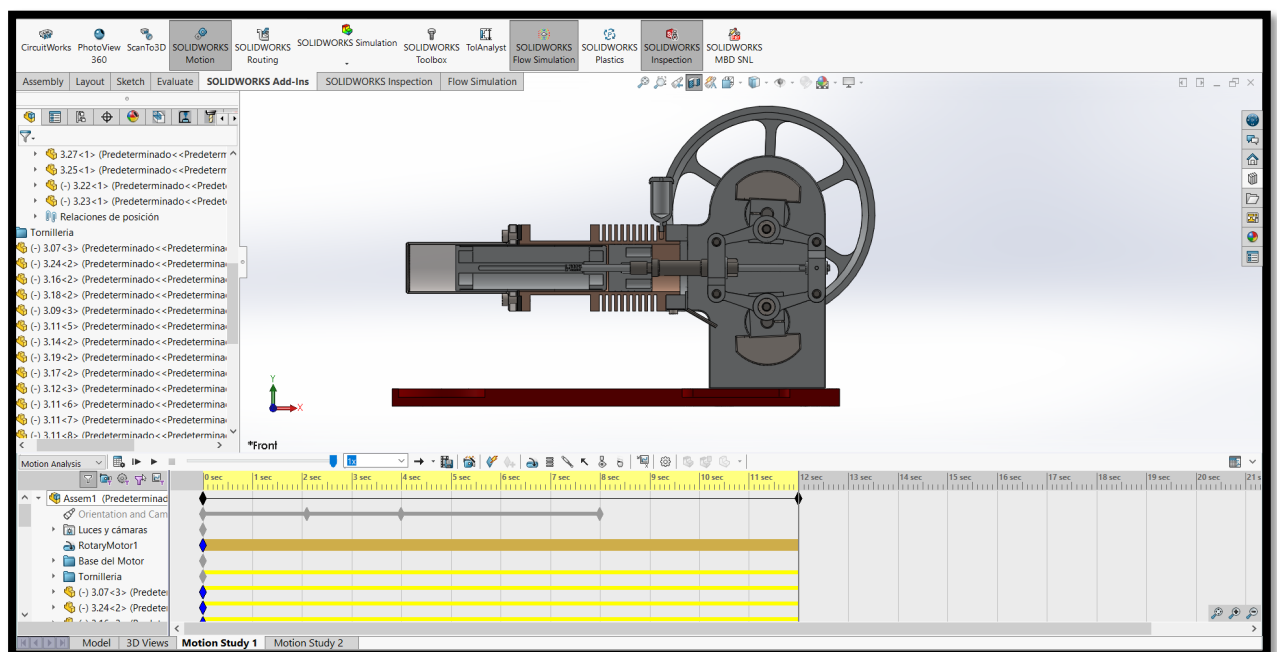


Figura 6-1. Herramienta SolidWorks Motion para el análisis cinemático del conjunt

Para realizar la simulación cinemática hay que elegir ciertos parámetros de entrada en *SolidWorks Motion*. Los parámetros son: la elección de un motor o rotor, velocidad de ese motor, el tiempo de simulación y otros

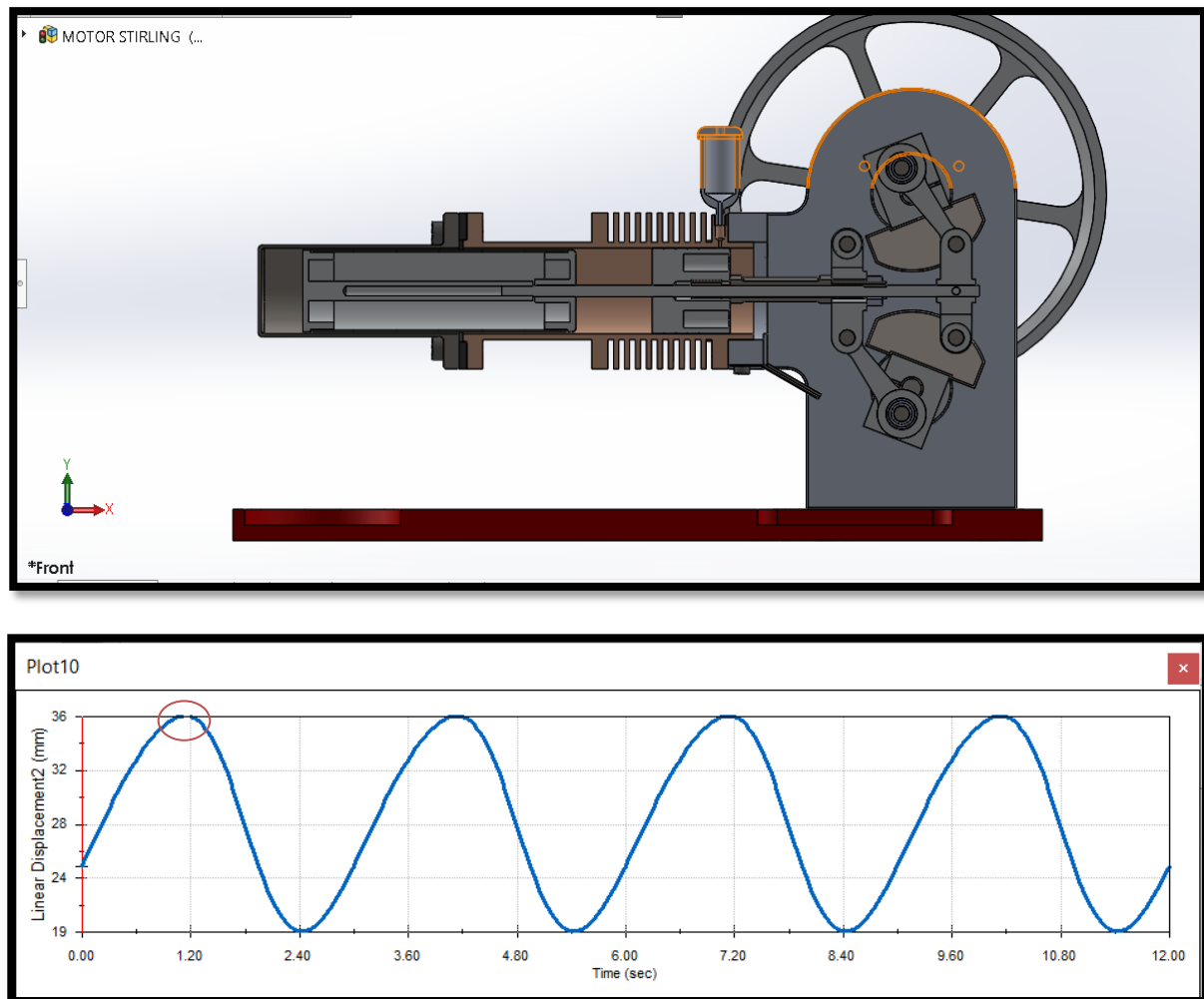


Figura 6-3. Desplazamiento lineal del motor Stirling en el instante 1,18 s.

Lo primero que podemos observar en la figura superior es que se trata de una gráfica que tiene una forma sinoidal, esto es debido a que el movimiento del pistón dentro del cilindro representa un movimiento de vaivén. En la figura anterior se puede observar al pistón que está en su posición más estirada y que coincide en la parte de la gráfica con el desplazamiento lineal más elevado, en el instante 1,2 segundos. Podemos concluir que los resultados son correctos y tienen una exacta correlación entre la gráfica y el movimiento del pistón.

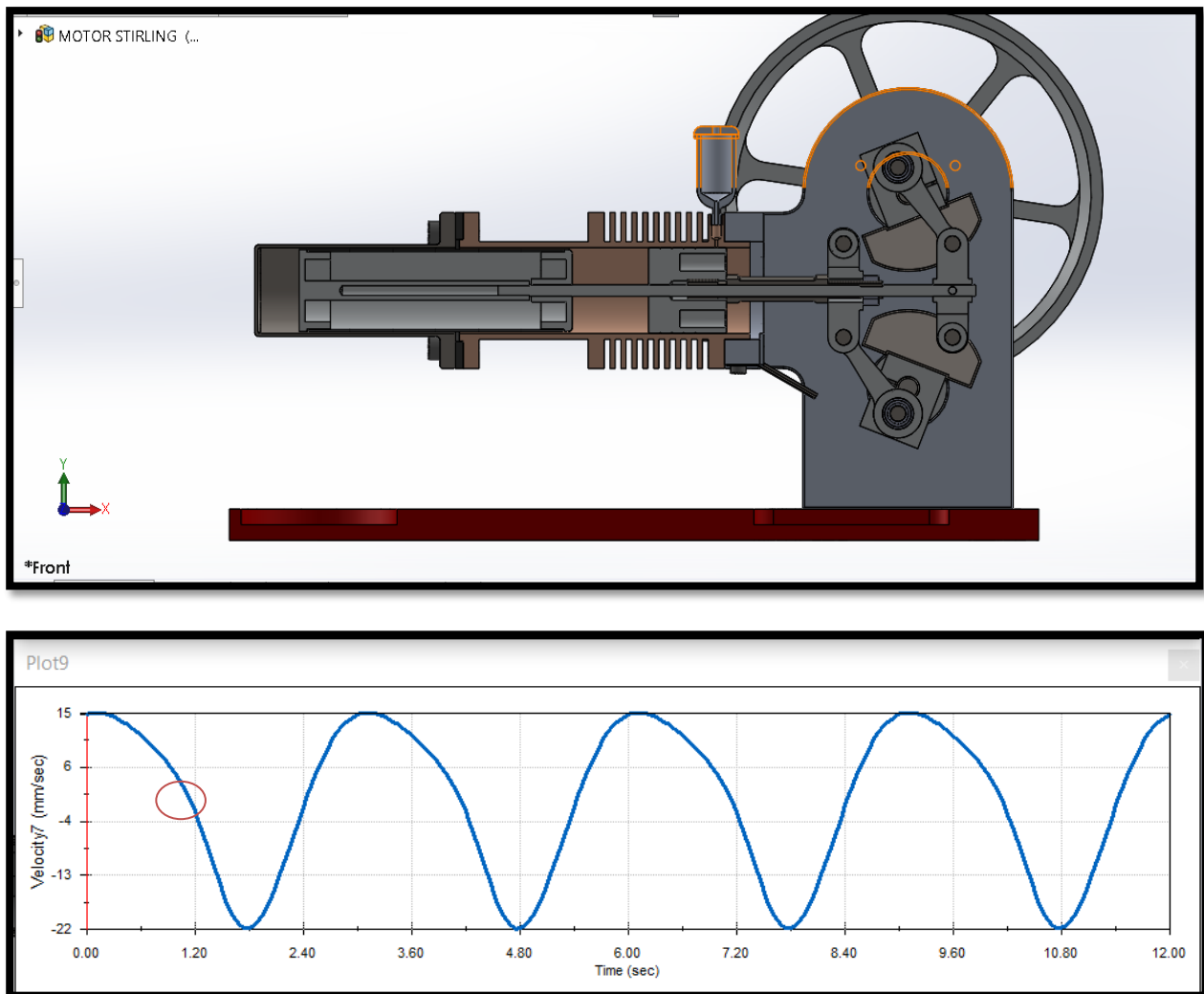


Figura 6-4. Velocidad lineal del motor Stirling en el instante 1.18 s.

En ese mismo instante (1,18 segundos) podemos observar que la velocidad lineal del pistón es nula, y el pistón se encuentra en la zona más estirada en ese instante, por lo que los resultados son exactos.

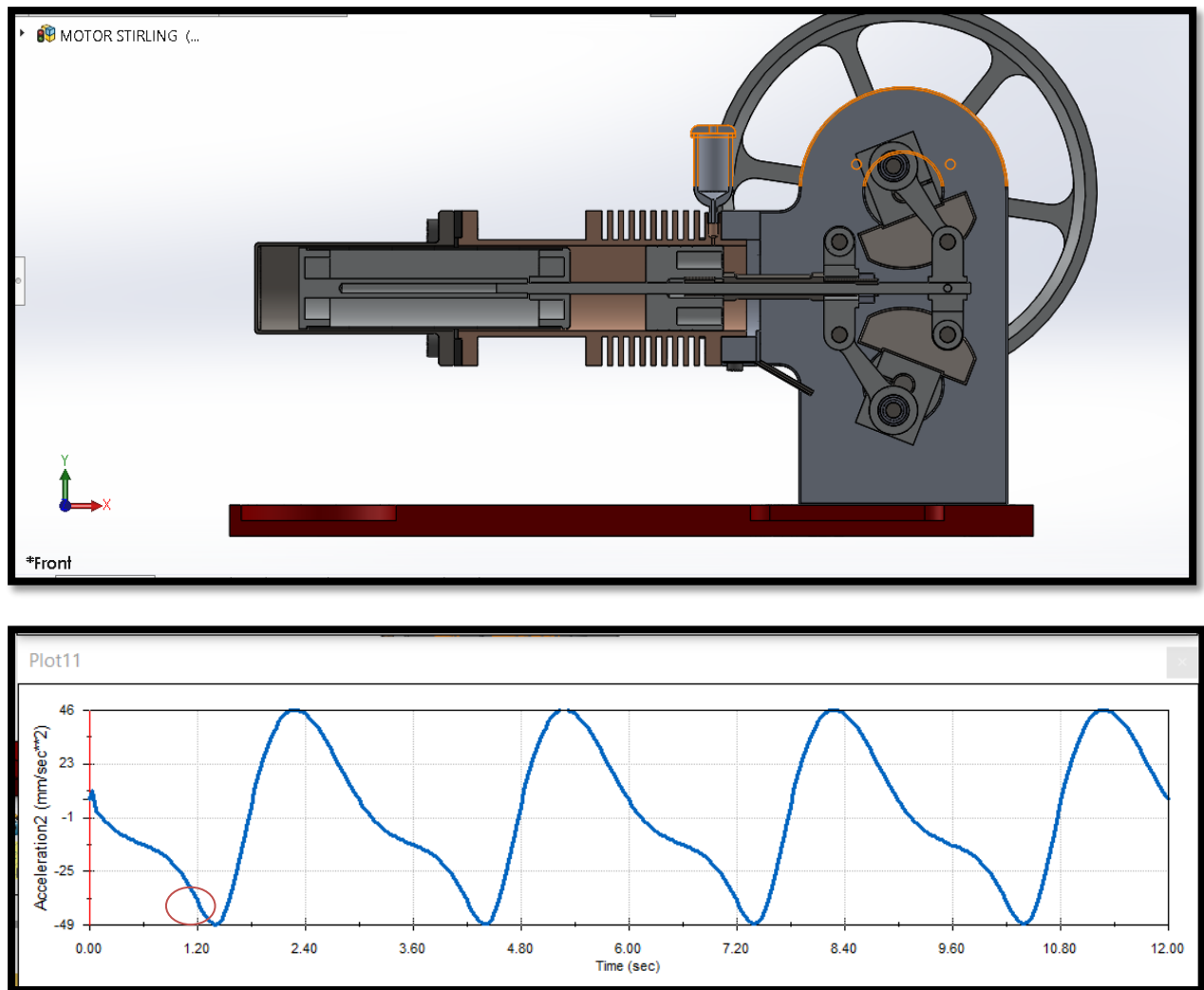


Figura 6-5. Aceleración lineal del motor Stirling en el instante 1.18 s.

En el instante 1,18 segundos, donde se ha extraído conclusiones finales en el desplazamiento y velocidad, podemos observar como está en su punto más alto (o casi) de aceleración lineal, y observando la posición del pistón, en su posición más estirada, podemos concluir la validez de los resultados en los tres casos estudiados para ese mismo instante.

Asimismo, observando la gráfica en su totalidad, al tratarse de un movimiento senoidal, el movimiento se repite con un periodo de 3 segundos aproximadamente.

Sabiendo que el periodo es $T=3$ s y que la frecuencia es la inversa del periodo $f = T^{-1} = 0,3333 \text{ s}^{-1}$, podríamos calcular la velocidad angular del rotor $f = \frac{\omega}{2\pi} = 0,333 \rightarrow \omega = 2,09 \text{ rad/s}$. Esta velocidad angular la pasamos a rpm y nos sale $\omega = 2,09 \frac{\text{rad}}{1 \text{ segundo}} \cdot \frac{60 \text{ segundos}}{1 \text{ min}} \cdot \frac{1 \text{ rev}}{2\pi \text{ rad}} = 20 \text{ rpm}$. El resultado sale exactamente el valor elegido como condición de contorno del sistema. Por lo que podemos concluir que la simulación cinemática concuerda con los resultados obtenidos.

7 ANÁLISIS TÉRMICO POR ELEMENTOS FINITOS

El método de elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés) es un método ampliamente utilizado para resolver numéricamente ecuaciones diferenciales que surgen en ingeniería y modelado matemático. Las áreas problemáticas típicas de interés incluyen los campos tradicionales de análisis estructural, transferencia de calor, transporte de fluidos, transporte de masa y potencial electromagnético. El FEM es un método numérico general para resolver ecuaciones diferenciales parciales en dos o tres variables espaciales (es decir, algunos problemas de valores de frontera). Para resolver un problema, el FEM subdivide un sistema grande en partes más pequeñas y simples que se llaman elementos finitos. Esto se logra mediante una particular discretización espacial en las dimensiones del espacio, que se implementa mediante la construcción de una malla del objeto: el dominio numérico para la solución, que tiene un número finito de puntos. La formulación del método de elementos finitos de un problema de valores en la frontera finalmente da como resultado un sistema de ecuaciones algebraicas [31].

El método aproxima la función desconocida sobre el dominio. Las ecuaciones simples que modelan estos elementos finitos se ensamblan luego en un sistema más grande de ecuaciones que modela todo el problema.

El FEM luego usa métodos variacionales del cálculo de variaciones para aproximar una solución minimizando una función de error asociada.

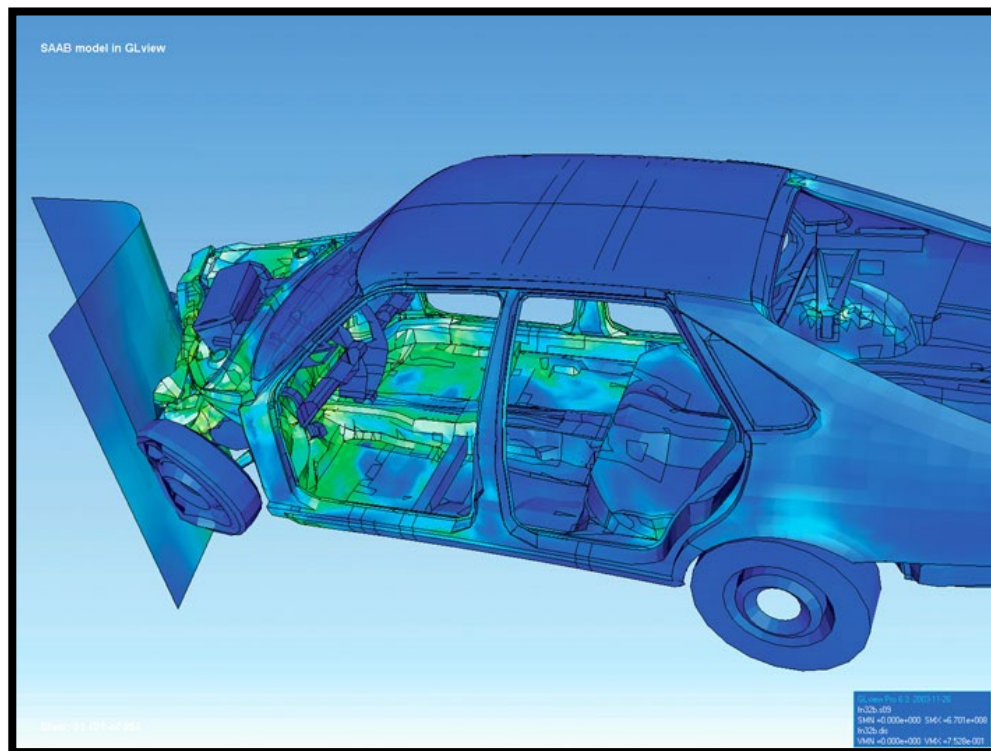


Figura 7-1. Cálculo de las fuerzas ejercidas en un coche por FEM [32]

Para el presente proyecto, el análisis de elementos finitos se usará para poder realizar un análisis térmico del motor Stirling, para poder comprender mejor su funcionamiento.

Cabe destacar, que no se va a relizar un análisis de fuerzas debido a la complejidad del mismo y que quedaría fuera de los dominios de este proyecto, pero sí podría servir como introducción para futuros proyectos sobre el motor Stirling.

Para realizar un análisis térmico del motor Stirling conviene saber que tipos de transferencias de calor va a sufrir el conjunto, para así poder analizar mejor los resultados. Los modos de transferencias de calor que va a sufrir el conjunto son: conducción, convección y radiación.

Primero, se explicará de una manera sencilla cada uno de los modos de transferencias de calor que va a sufrir el cuerpo y después se mostrará los resultados obtenidos en el conjunto.

La conducción de calor o transferencia de energía en forma de calor por conducción es un proceso de transmisión de calor basado en el contacto directo entre los cuerpos, sin intercambio de materia, porque el calor fluye desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura que está en contacto con el primero [33].

La conducción térmica está determinada por la ley de Fourier, que establece que el flujo de transferencia de calor por conducción en un medio isótropo es proporcional y de sentido contrario al gradiente de temperatura en esa dirección [33].

El caso más general de la ecuación de conducción, expresada en forma diferencial, refleja el balance entre el flujo neto de calor, el calor generado y el calor almacenado en el material. La fórmula que gobierna el caso más general es la siguiente:

$$\alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{q}G}{\rho C_p} = \frac{\partial T}{\partial t}$$

Para el caso simplificado de flujo de calor estacionario en una sola dirección, el calor transmitido es proporcional al área perpendicular al flujo de calor, a la conductividad del material y a la diferencia de temperatura, y es inversamente proporcional al espesor.

$$\frac{Q}{\Delta t} = \frac{kA}{x} (T_1 - T_2)$$

La convección es la transferencia de calor de un lugar a otro debido al movimiento del fluido. Aunque a menudo se discute como un método distinto de transferencia de calor, la transferencia de calor por convección implica los procesos combinados de conducción (difusión de calor) y advección (transferencia de calor por flujo de fluido a granel). La convección suele ser la forma dominante de transferencia de calor en líquidos y gases [34]. La fórmula que se utiliza para la convección de un cuerpo es la siguiente:

$$\dot{Q} = hA(T_s - T_\infty)$$

En la fórmula, la $\dot{Q}$ representa al calor por convección, medido en W, en el SI. El área del cuerpo en contacto con el fluido, A . T_s , la emperatura de la superficie del cuerpo y T_∞ la temperatura del fluido a cierta distancia del cuerpo [34].

La h es el coeficiente de película, el cual cuantifica la influencia de las propiedades del fluido, de la superficie y del flujo cuando se produce transferencia de calor por convección. Para este proyecto se harán dos simulaciones con diferentes coeficientes de película y así poder observar cómo cambia los resultados según el tipo de coeficiente elegido [34].

Tamién, otra forma de transferencia de calor que se da es la radiación, esta es la emisión o transmisión de energía en forma de ondas o partículas a través del espacio o de un medio material [35]. En este proyecto se va a despreciar la transferencia de calor por radiación debido a que se considera despreciable en comparación a la transferencia de calor debida a la convección.

7.1 Aplicación de las condiciones de contorno al sistema

Debido a la gran cantidad de recursos que consume este análisis térmico, se ha decidido hacer solo a una parte del conjunto motor Stirling y no en su totalidad. Para posibles análisis futuros, sí se podría hacer un análisis a todo el conjunto con un ordenador con más potencia de procesamiento para poder ver el resultado con mayor precisión.

En primer lugar, se deben de elegir los materiales en cada pieza. Se ha elegido para el cilindro de calentamiento una aleación de acero (1023 carbon steel), para el cilindro con aletas se ha elegido una aleación de bronce, para la junta, un plástico PVC elástico y para las demás piezas aluminio. Esto es importante, ya que, según el material, sus características físicas cambian.

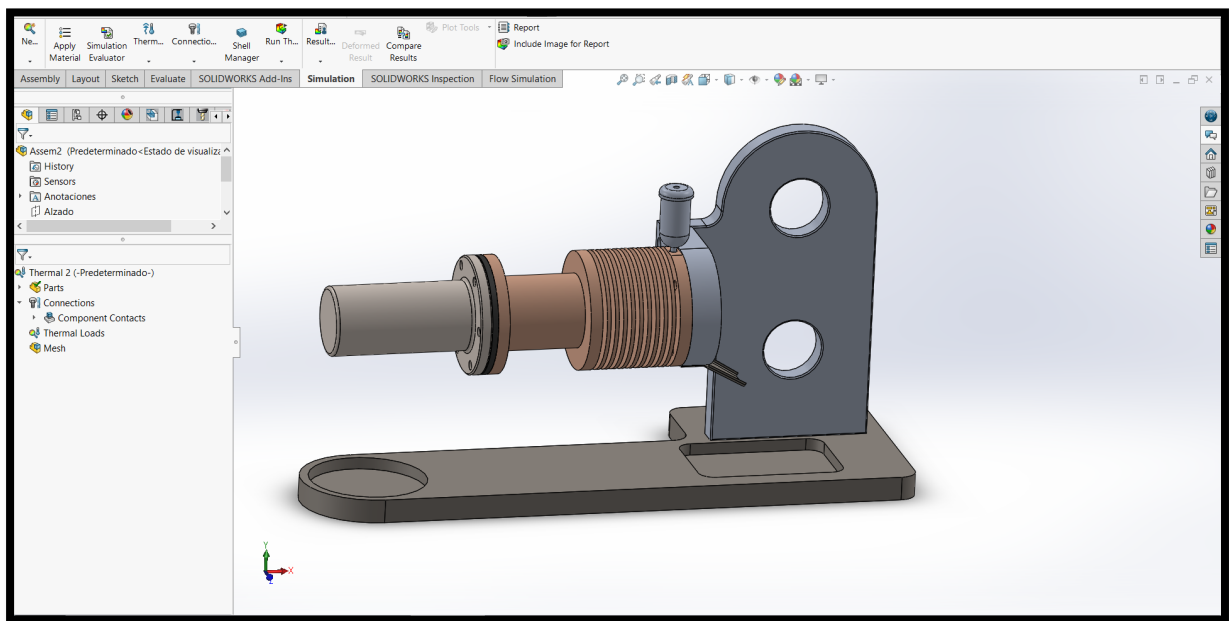


Figura 7-2. Conjunto que será simulado en SolidWorks

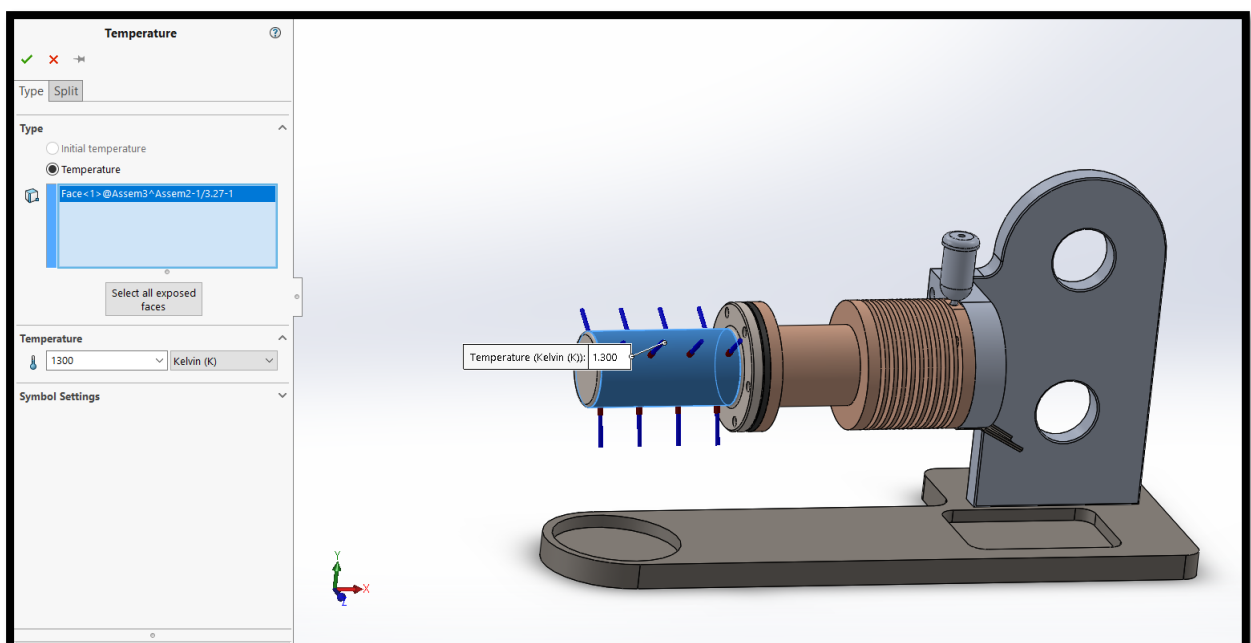


Figura 7-3. Condiciones de contorno de temperatura para el análisis térmico.

Se deben de definir las condiciones de contorno necesarias para realizar el problema de análisis térmico. En este caso se definirá la temperatura de contorno del cilindro de calentamiento, y la convección de todos los cuerpos que hay en el análisis. En el caso de la temperatura de contorno del cilindro de calentamiento, se ha elegido una temperatura de 1300K.

7.2 Elección del coeficiente de película h

La segunda condición de contorno será la de aplicar la convección en todas las caras expuestas. Para ello, debemos de elegir un valor de coeficiente de película, explicado anteriormente. Para gases (como el aire) a temperatura ambiente y velocidad nula, el coeficiente de película que se suele usar está entre los valores 1 - 5 y para convección forzada (velocidad no nula) entre 10 – 50 [36].

En este caso, vamos a calcular el coeficiente de película considerando dos situaciones en nuestro proyecto:

1. Cálculo del coeficiente de película para una convección libre (velocidad del fluido nula).
2. Cálculo del coeficiente de película para una convección forzada (velocidad del fluido no nula).

Antes de realizar los cálculos en ambas situaciones debemos asumir ciertas consideraciones. Al tratarse de un sólido con una superficie no definida, vamos a asumir que el sólido se comporta como un cilindro en su conjunto. La temperatura del fluido es de 300K y la temperatura del sólido de 1300K.

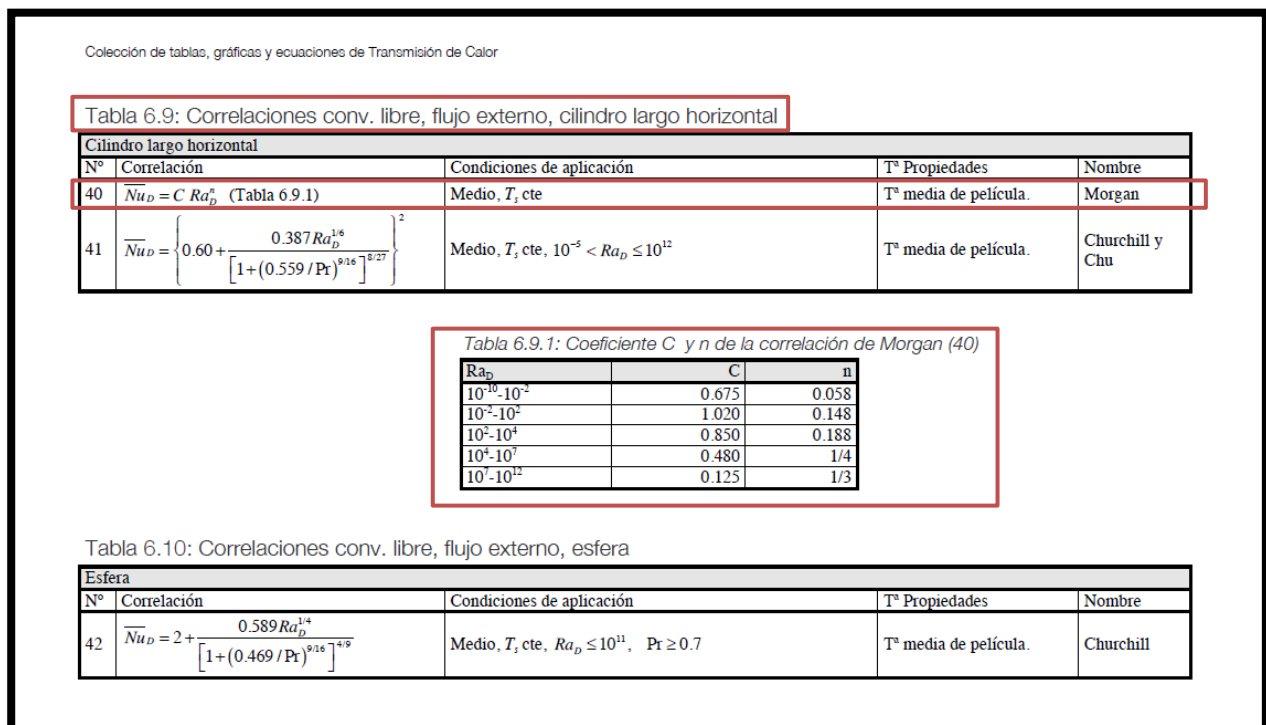


Figura 7-4. Correlaciones para la convección libre en un sólido [36].

Para una convección libre, flujo externo y considerando la supercie del conjunto como un sólido cilíndrico, la fórmula necesaria para calcular el h es:

$$Nu_D = \frac{hL}{k_f}$$

$$Nu_D = C Ra_D^n$$

Para el cálculo de los coeficientes C y n , debemos de conocer el número de Rayleigh (Ra), cuya fórmula es la siguiente:

$$Ra = \frac{g \beta |T_s - T_\infty| L^3}{\alpha \nu}$$

Donde los coeficientes de la fórmula se obtienen de la siguiente tabla [36]:

Tablas 4.4: Propiedades de gases a presión atmosférica

Tabla 4.4.1: Propiedades del aire seco a presión atmosférica

T (°C)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^6$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
-150	2.867	0.982	8.64	3.013	11.71	4.157	0.7246
-100	2.039	0.965	11.90	5.835	15.82	8.034	0.7263
-90	1.927	0.975	12.49	6.482	16.62	8.842	0.7330
-80	1.828	0.983	13.07	7.153	17.42	9.692	0.7381
-70	1.738	0.990	13.64	7.850	18.22	10.59	0.7414
-60	1.656	0.995	14.20	8.572	19.01	11.53	0.7433
-50	1.582	0.999	14.74	9.317	19.79	12.52	0.7440
-40	1.514	1.002	15.27	10.08	20.57	13.56	0.7436
-30	1.452	1.004	15.79	10.88	21.34	14.65	0.7425
-20	1.394	1.005	16.30	11.69	22.11	15.78	0.7408
-10	1.341	1.006	16.80	12.52	22.88	16.96	0.7387
0	1.292	1.006	17.29	13.38	23.64	18.17	0.7362
5	1.269	1.006	17.54	13.82	24.01	18.80	0.7350
10	1.247	1.006	17.78	14.26	24.39	19.44	0.7336
15	1.225	1.007	18.02	14.71	24.76	20.08	0.7323
20	1.204	1.007	18.25	15.16	25.14	20.74	0.7309
25	1.184	1.007	18.49	15.61	25.51	21.40	0.7296
30	1.164	1.007	18.72	16.08	25.88	22.08	0.7282
35	1.146	1.007	18.95	16.54	26.25	22.76	0.7268
40	1.117	1.007	19.18	17.02	26.62	23.45	0.7255
45	1.110	1.007	19.41	17.49	26.99	24.16	0.7241
50	1.092	1.007	19.63	17.97	27.35	24.87	0.7228
55	1.076	1.007	19.86	18.46	27.72	25.59	0.7215
60	1.060	1.007	20.08	18.95	28.08	26.31	0.7202
65	1.044	1.007	20.30	19.45	28.45	27.05	0.7190
70	1.029	1.007	20.52	19.95	28.81	27.79	0.7177
75	1.014	1.008	20.74	20.45	29.17	28.55	0.7166
80	0.999	1.008	20.96	20.97	29.53	29.31	0.7154
85	0.986	1.008	21.17	21.48	29.88	30.07	0.7143
90	0.972	1.008	21.39	22.00	30.24	30.85	0.7132
95	0.959	1.009	21.60	22.52	30.60	31.63	0.7121
100	0.946	1.009	21.81	23.05	30.95	32.42	0.7111
110	0.921	1.010	22.23	24.12	31.65	34.02	0.7092

Con los valores de la tabla a una temperatura media entre $T_\infty = 300K$ y $T_s = 1300K$, el número de Rayleigh es:

$$Ra = \frac{g \beta |T_s - T_\infty| L^3}{\alpha \nu} = \frac{9,81 \cdot 1,25 \cdot 10^{-3} \cdot |1300 - 300| \cdot 0,2^3}{132,6 \cdot 185,5 \cdot 10^{-12}} = 3988242,6$$

Con $Ra > 10^7$ [36], podemos decir que $C=0,125$ y $n=1/3$ según la figura 7.4. Por lo que el número de Nusselt nos queda:

$$Nu_D = C Ra_D^n = 0,125 \cdot 3988242,6^{1/3} = 19,82$$

Despejando la h de la ecuación anterior obtenemos que el coeficiente de película para una convección libre es de: $h=6,97$.

Repitiendo los cálculos para el caso de convección forzada obtenemos un coeficiente de película de $h=62,1$.

Una vez tenemos los resultados de los coeficientes de película necesarios ya podríamos simular la evolución de temperaturas en SolidWorks. Antes primero debemos de aplicar las condiciones de contorno de convección a todas las caras, como podemos ver en la figura a continuación.

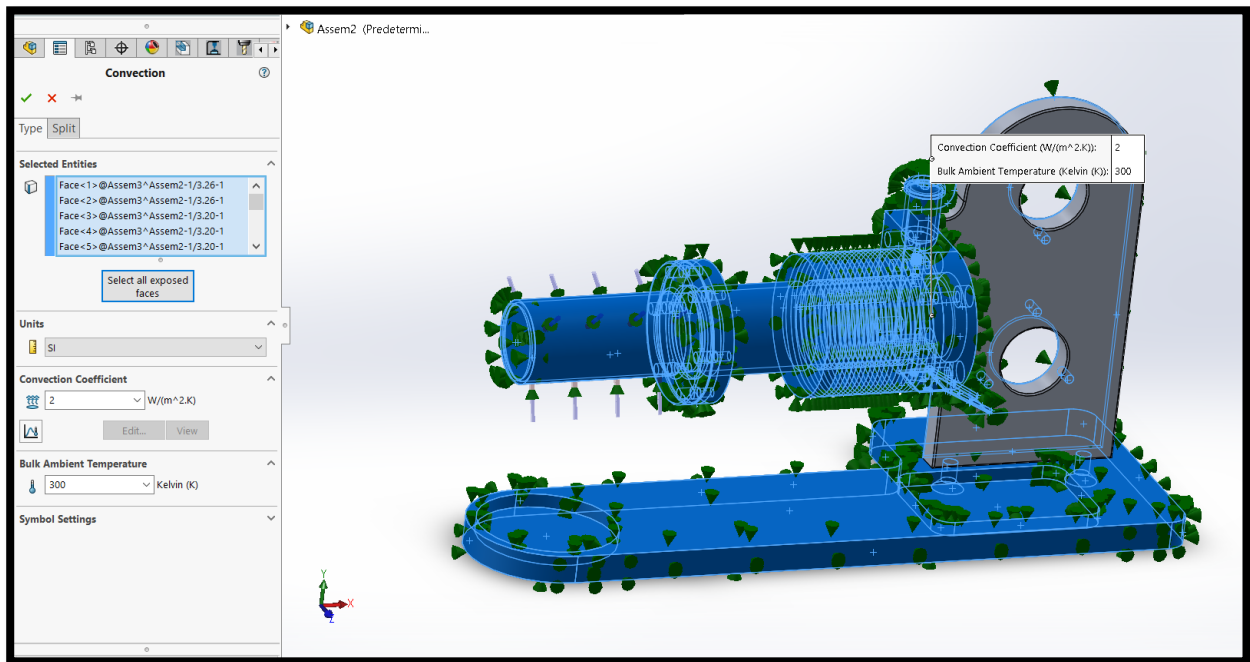


Figura 7-5. Condiciones de contorno de convección para todas las caras expuestas.

Una vez definido el tipo de material y las condiciones de contorno necesarias, debemos de definir el tipo de malla que se usará en el proyecto. La malla utilizada es de tipo triangular, con una definición media de 10 mm por tamaño de malla.

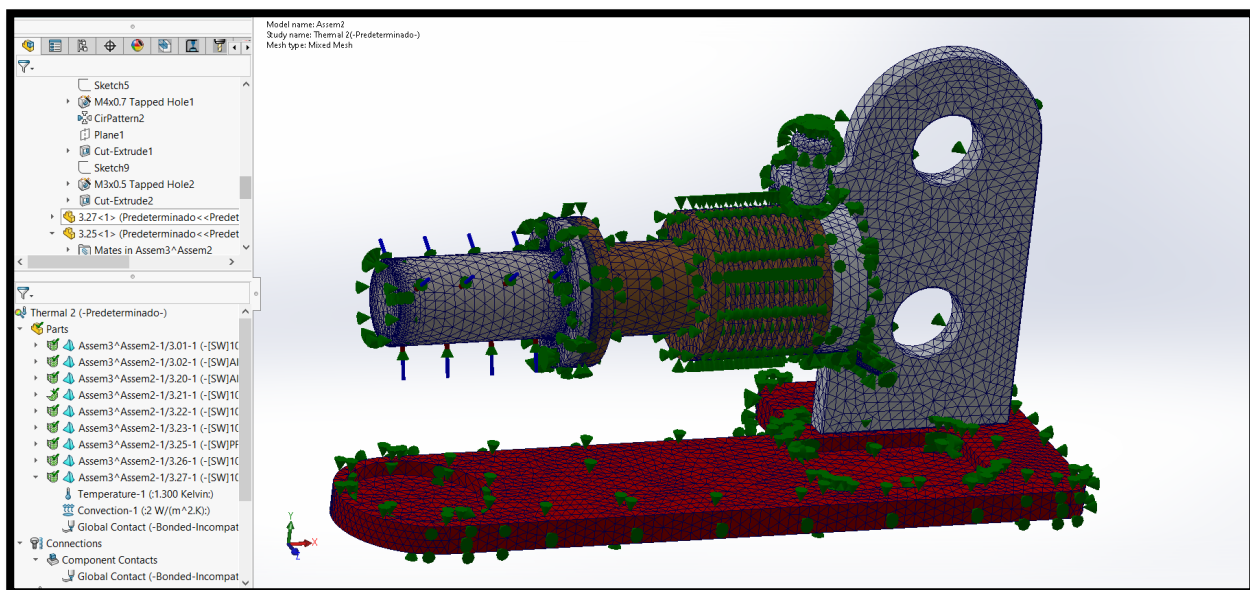


Figura 7-6. Malla utilizada para simular el problema de elementos finitos.

7.3 Resultados de la simulación térmica

Para la primera simulación se ha elegido las siguientes condiciones de contorno:

- Coeficiente de película: $h = 6,67 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Temperatura máxima: 1300K
- Temperatura ambiente: 300K

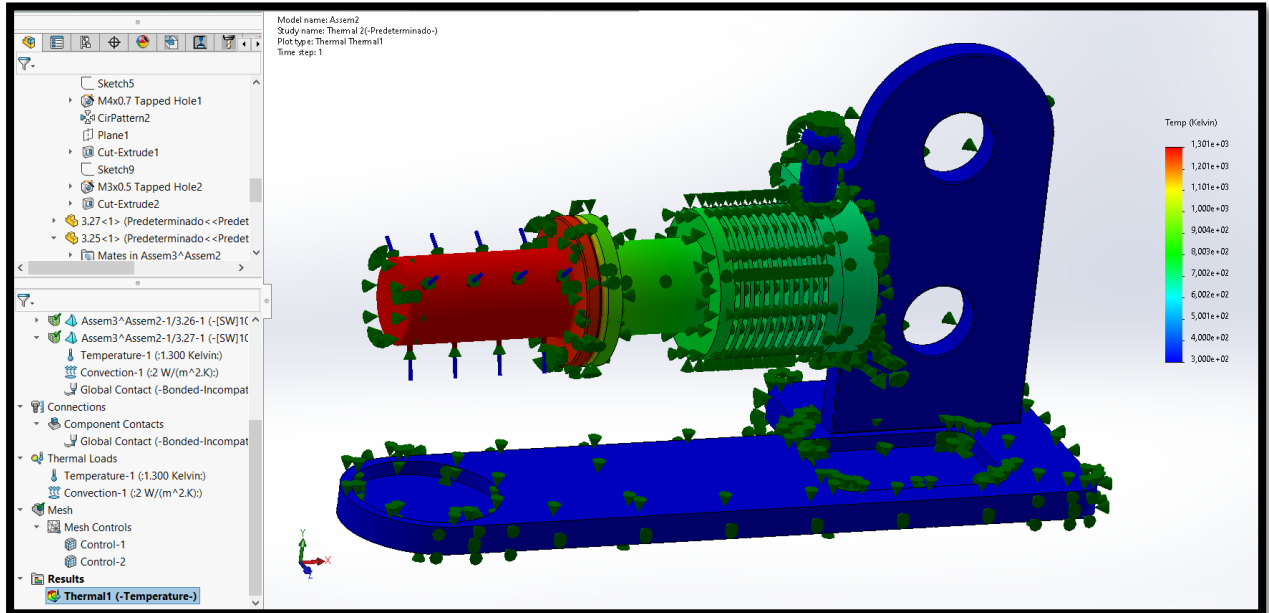


Figura 7-7. Resultados de la simulación térmica con $h = 6,67 \text{ W/m}^2\text{K}$

Para la segunda simulación se ha supuesto que hay una convección forzada a una velocidad del fluido 1 m/s. Los cálculos para este tipo de convección nos llevaron a un coeficiente de película superior al anterior ($h=62,1$), aproximadamente de un orden de magnitud superior. Esto, nos lleva a pensar que la cantidad de calor extraída del sistema será mayor, debido a que la cantidad de vatios por superie es de mayor.

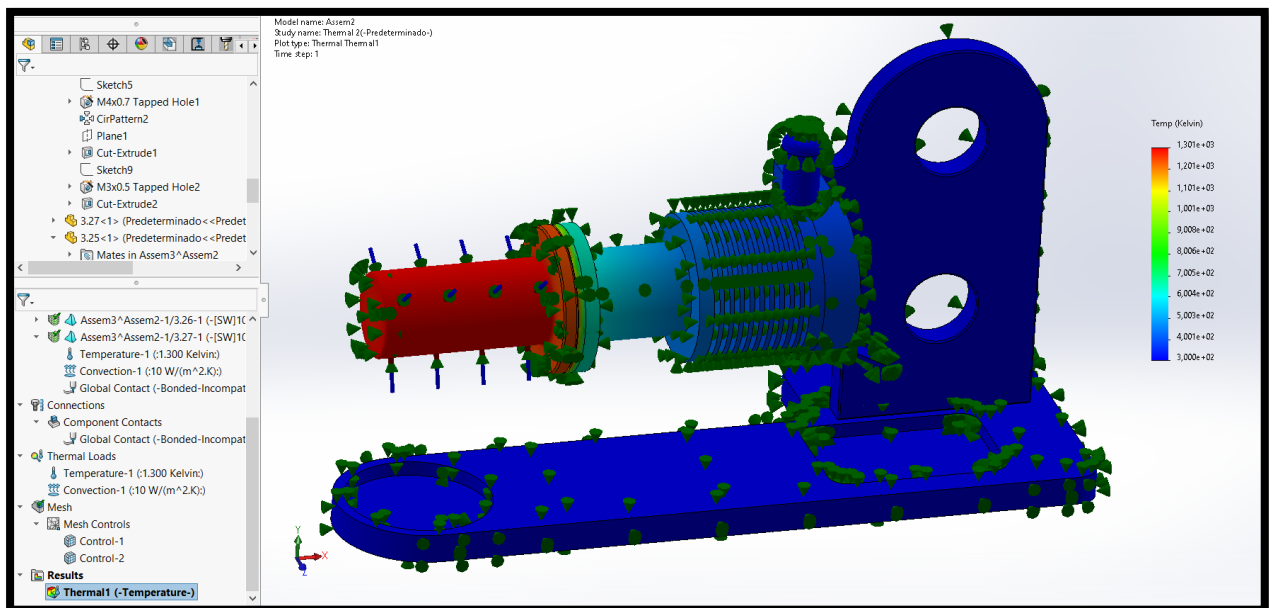


Figura 7-8. Resultados de la simulación térmica con $h = 67,1 \text{ W/m}^2\text{K}$

Según se ve en los resultados, en la primera simulación el cilindro aletado se ve de color verde casi en su totalidad, mientras que en la segunda simulación se ve un gradiente de color entre el verde y el azul, mostrando que el cilindro en la segunda simulación está mas frío que en la primera.

Estos resultados, están muy acorde a lo que se podría pensar antes de hacer la simulación debido a que, a mayor coeficiente de película, más calor será extraído del cuerpo por metro cuadrado, dejando para la segunda simulación un cilindro más frío que en la primera simulación. Por lo que se puede concluir que estos resultados son buenos.

8 IMPRESIÓN EN 3D DEL MOTOR

En este capítulo se explicará el proceso de impresión en 3D del motor Stirling, el tipo de material utilizado en la impresión y se explicará qué es la fabricación aditiva, qué procesos de fabricación hay, qué aplicaciones tiene y por qué la fabricación aditiva es una disciplina que, día tras día, está en continuo crecimiento.

8.1 Qué es la fabricación aditiva

La fabricación aditiva (Additive Manufacturing), también conocida como impresión 3D, es un enfoque transformador de la producción industrial que permite la creación de piezas y sistemas más ligeros y resistentes [37]. Las impresoras 3D son por lo general más rápidas, más baratas y más fáciles de usar que otras tecnologías de fabricación por adición, aunque como cualquier proceso industrial, estarán sometidas a un compromiso entre su precio de adquisición y la tolerancia en las medidas de los objetos producidos.

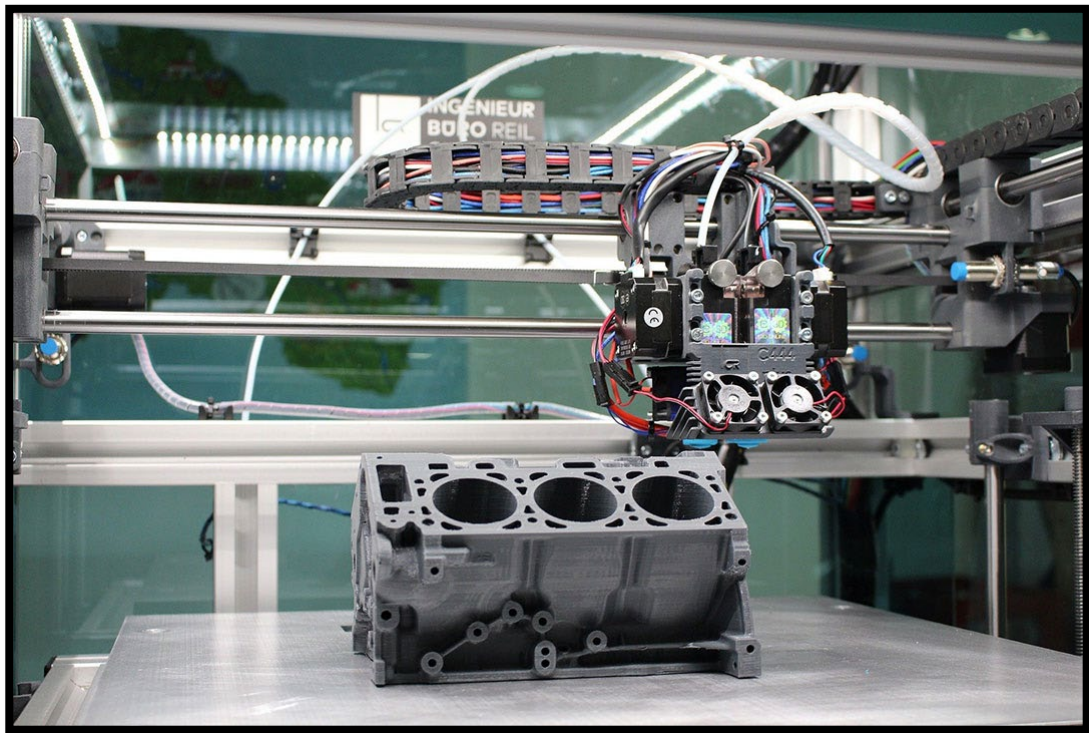


Figura 8-1. Impresión en 3D de un motor de combustión interna [38]

Las impresoras 3D ofrecen a los desarrolladores del producto la capacidad para imprimir partes y montajes hechos de diferentes materiales con diferentes propiedades físicas y mecánicas, a menudo con un simple proceso de ensamble. Las tecnologías avanzadas de impresión 3D pueden incluso ofrecer modelos que pueden servir como prototipos de producto. La impresión 3D abarca un gran número de tecnologías, sus principales diferencias se encuentran en la forma en la que las diferentes capas son usadas para crear piezas. Algunos métodos usan fundido o ablandamiento del material para producir las capas, por ejemplo sinterizado de láser selectivo (SLS) y modelado por deposición fundida (FDM) [37], mientras que otros depositan materiales líquidos que son curados con diferentes tecnologías. En el caso de manufactura de objetos laminados, delgadas capas son cortadas para ser moldeadas y unidas juntas.

8.2 Historia de la fabricación aditiva

Las primeras iteraciones documentadas de la impresión 3D se remontan a principios de la década de 1980, en Japón. En 1981, Hideo Kodama estaba tratando de encontrar una manera de desarrollar un sistema de creación rápida de prototipos. Se le ocurrió un enfoque capa por capa para la fabricación, utilizando una resina fotosensible que fue polimerizada por luz ultravioleta [39].

Aunque Kodama no pudo presentar el requisito de patente de esta tecnología, a menudo se le acredita como el primer inventor de este sistema de fabricación, que es una versión temprana de la máquina SLA moderna.

En todo el mundo, unos años después, un trío de investigadores franceses también buscaba crear una máquina de creación rápida de prototipos. En lugar de resina, buscaron crear un sistema que curara los monómeros líquidos en sólidos mediante el uso de un láser. Al igual que Kodama, no pudieron presentar una patente para esta tecnología, pero aún se les atribuye la creación del Sistema [39].

Ese mismo año, Charles Hull, presentó la primera patente de estereolitografía (SLA). Un constructor de muebles estadounidense que estaba frustrado por no poder crear fácilmente piezas pequeñas personalizadas, Hull desarrolló un sistema para crear modelos 3D curando la resina fotosensible capa por capa.

En 1986 presentó su solicitud de patente para la tecnología y en 1988 fundó 3D Systems Corporation. La primera impresora 3D SLA comercial, la SLA-1, fue lanzada por su empresa en 1988. Pero SLA no fue el único proceso de fabricación aditiva que se exploró durante este tiempo [40].

En 1988, Carl Deckard de la Universidad de Texas presentó la patente para la tecnología de sinterización selectiva por láser (SLS). Este sistema fusionó polvos, en lugar de líquidos, utilizando un láser [40].

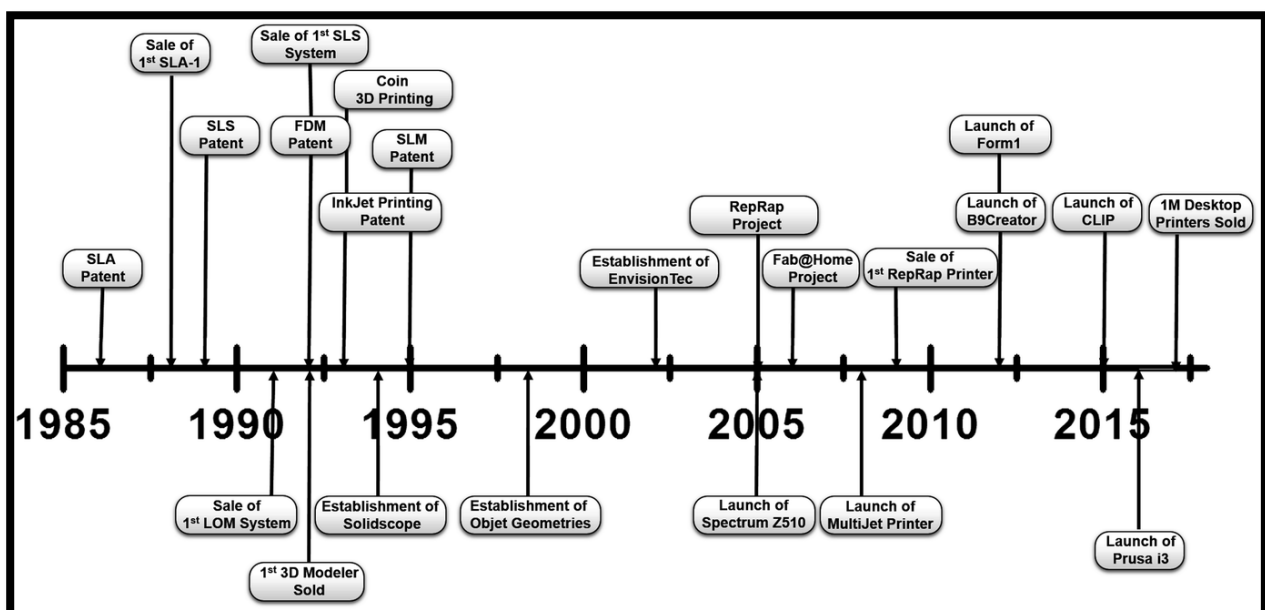


Figura 8-2. Línea de tiempo de los avances en la impresión 3D [41]

En los años 90, muchas empresas y startups comenzaron a surgir y experimentar con las diferentes tecnologías de fabricación aditiva. En 2006, se lanzó la primera impresora SLS disponible comercialmente, lo que cambió el juego en términos de creación de fabricación bajo demanda de piezas industriales.

Las herramientas CAD también estuvieron más disponibles en este momento, lo que permitió a las personas desarrollar modelos 3D en sus computadoras. Esta es una de las herramientas más importantes en las primeras etapas de la creación de una impresión 3D.

Durante este tiempo, las máquinas eran muy diferentes a las que usamos ahora. Eran difíciles de usar, costosas y muchas de las impresiones finales requerían mucho procesamiento posterior. Pero cada día se producían innovaciones y se perfeccionaban e inventaban nuevos descubrimientos, métodos y prácticas.

Luego, en 2005, el Open Source cambió el juego de la impresión 3D, dando a las personas más acceso a esta tecnología. El Dr. Adrian Bowyer creó el Proyecto RepRap, que fue una iniciativa de código abierto para crear una impresora 3D que podría construir otra impresora 3D, junto con otros objetos impresos en 3D.

En 2008, se imprimió la primera pierna protésica, lo que llevó a la impresión 3D al centro de atención e introdujo el término a millones de personas en todo el mundo.

Luego, en 2009, las patentes FDM presentadas en los años 80 pasaron al dominio público, alterando la historia de la impresión 3D y abriendo la puerta a la innovación. Debido a que la tecnología ahora estaba más disponible para las nuevas empresas y la competencia, los precios de las impresoras 3D comenzaron a disminuir y la impresión 3D se volvió cada vez más accesible [40].

8.3 Procesos de fabricación aditiva

Existe una variedad de diferentes procesos de fabricación aditiva. En este apartado veremos las mas importantes y se hará una breve explicación en cada una de ellas. Asimismo, veremos cual es la tecnología de impresión que se ha usado en este proyecto.

La tecnología Powder Bed Fusion (PBF)

Se utiliza en una variedad de procesos de AM, incluida la sinterización directa por láser de metales (DMLS), la sinterización selectiva por láser (SLS), la sinterización selectiva por calor (SHS), la fusión por haz de electrones (EBM) y la fusión directa por láser de metales (DMLM). Estos sistemas utilizan láseres, haces de electrones o cabezales de impresión térmica para fundir o fundir parcialmente capas ultrafinas de material en un espacio tridimensional. Cuando concluye el proceso, el exceso de polvo se elimina del objeto [42].

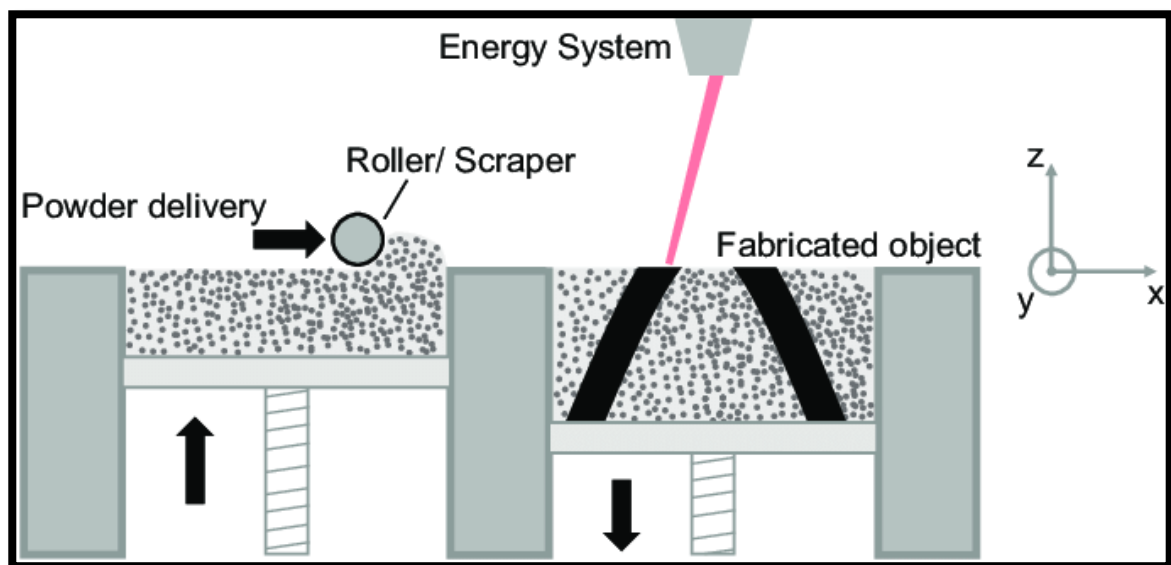


Figura 8-3. Tecnología Powder Bed Fusion (PBF) [43]

Binder Jetting

Binder jetting es un proceso de fabricación aditiva que usa un agente de unión entre líquidos y polvos para construir un componente. Los polvos comunes usados en binder jetting incluyen polvos MIM (moldeado de inyección metálica), cerámica, polímeros y arena - dependiendo de las características de la parte que está siendo fabricada. El agente de unión líquido se deposita sobre el polvo capa a capa, antes de que el cuerpo sea introducido en un horno para su tratamiento. Una vez completado, el polvo suelto es eliminado, dejando el componente terminado [44].

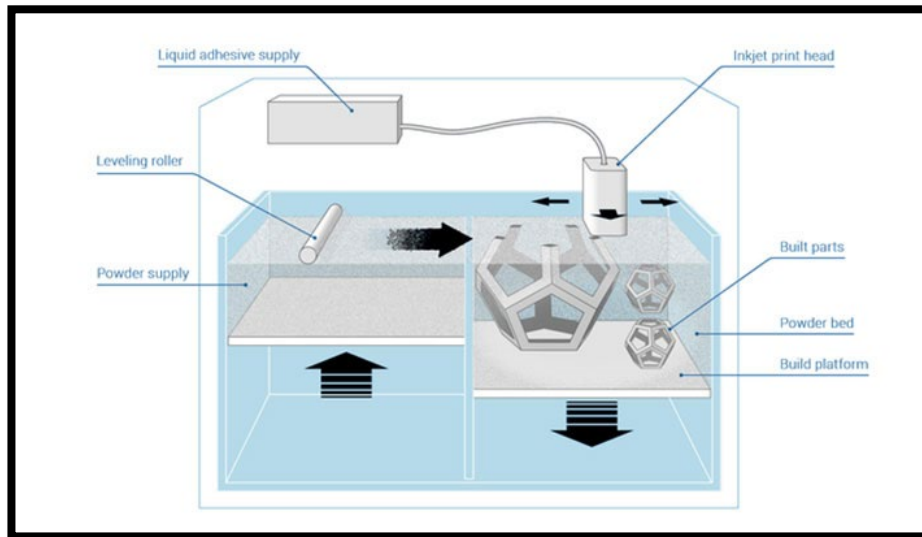


Figura 8-4. Tecnología Binder Jetting [45]

Directed Energy Deposition

El proceso de deposición de energía dirigida (DED) es similar a la extrusión de materiales, aunque se puede utilizar con una variedad más amplia de materiales, incluidos polímeros, cerámicas y metales. Una pistola de haz de electrones o un láser montado en un brazo de cuatro o cinco ejes funde alambre o filamento o polvo [46].

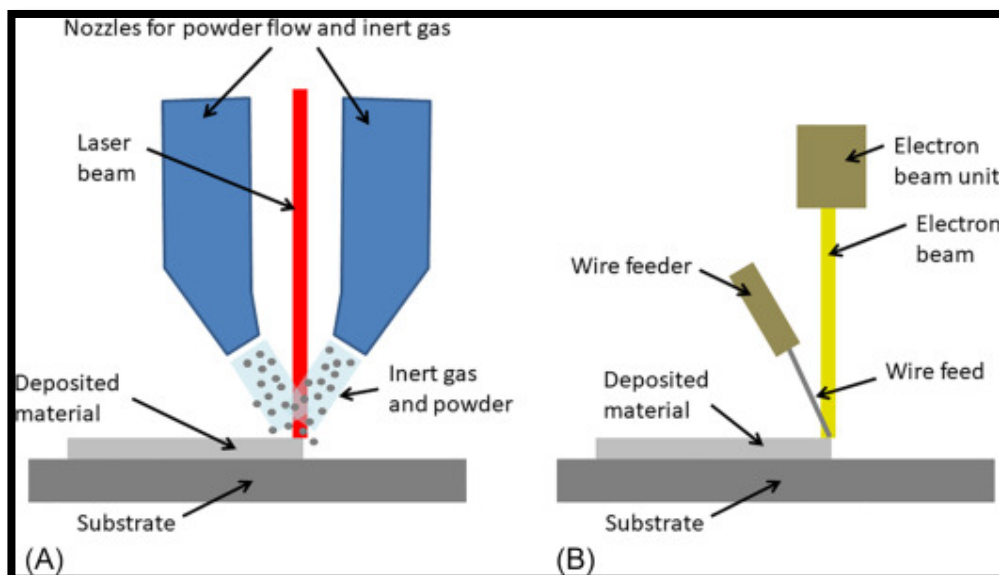


Figura 8-5. Tecnología Directed Energy Deposition [47]

Material Extrusion

La extrusión de material es uno de los procesos de fabricación aditiva más conocidos. Los polímeros enrollados se extruyen o se extraen a través de una boquilla calentada montada en un brazo móvil. La boquilla se mueve horizontalmente mientras que el lecho se mueve verticalmente, lo que permite que el material derretido se construya capa tras capa. La adhesión adecuada entre capas se produce mediante un control preciso de la temperatura o el uso de agentes de unión químicos [48].

Al ser el proceso de fabricación más habitual y menos costoso, ha sido este el proceso de fabricación aditiva que se ha utilizado en el Proyecto. En apartados posteriores veremos en más detalle este proceso de fabricación.

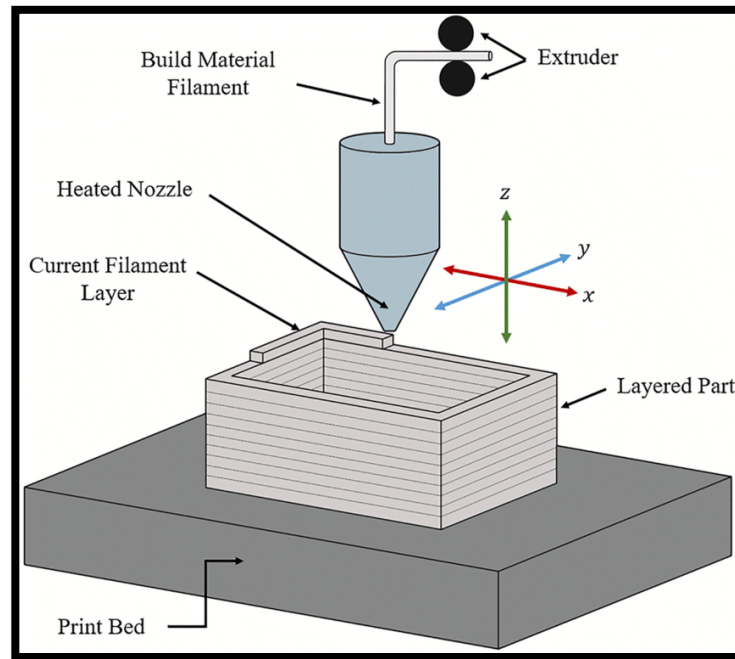


Figura 8-6. Tecnología de Material Extrusion [49]

Material Jetting

Con la inyección de material, un cabezal de impresión se mueve hacia adelante y hacia atrás, al igual que el cabezal de una impresora de inyección de tinta 2D. Sin embargo, normalmente se mueve sobre los ejes x, y y z para crear objetos 3D. Las capas se endurecen a medida que se enfrían o se curan con luz ultravioleta [50].

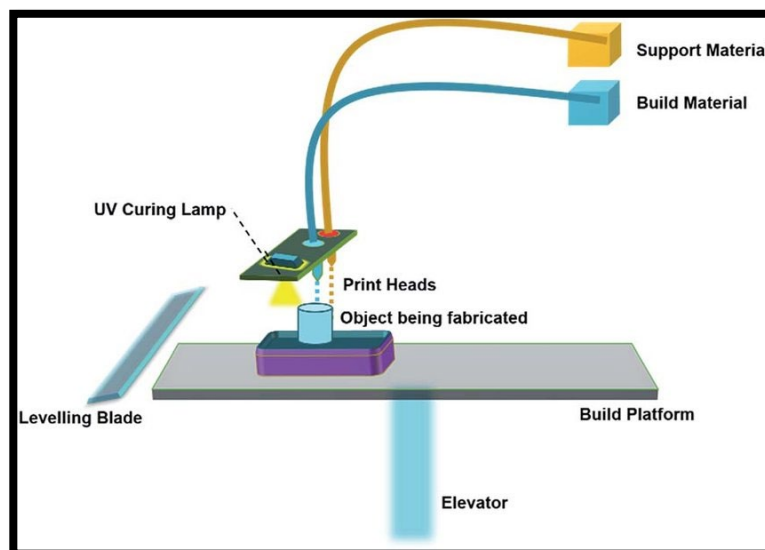


Figura 8-7. Tecnología de Material Jetting [51]

Sheet Lamination

La fabricación de objetos laminados (LOM) y la fabricación aditiva ultrasónica (UAM) son dos métodos de laminación de láminas. LOM utiliza capas alternas de papel y adhesivo, mientras que UAM emplea láminas de metal delgadas unidas mediante soldadura ultrasónica. LOM sobresale en la creación de objetos ideales para modelado visual o estético. La UAM es un proceso de baja energía y temperatura relativamente baja que se utiliza con varios metales, incluidos el titanio, el acero inoxidable y el aluminio [52].

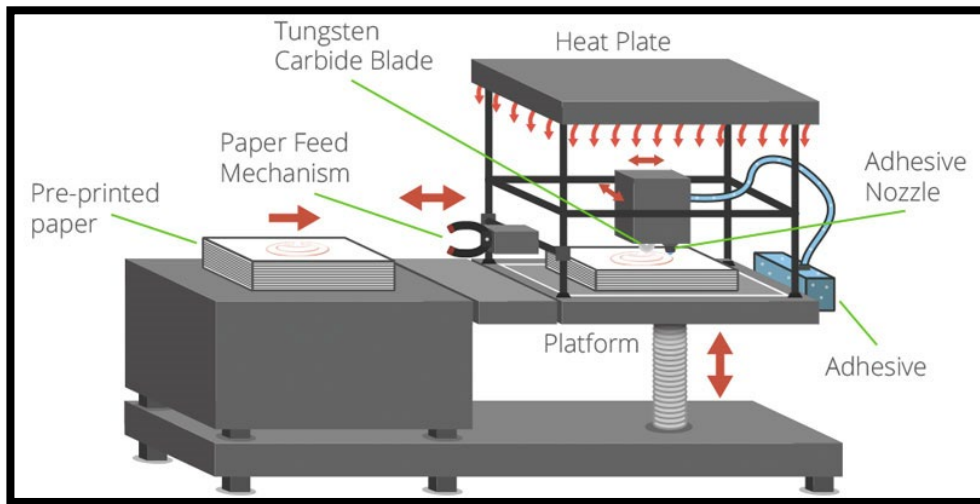


Figura 8-8. Tecnología de Sheet Lamination [53]

Vat Polymerization

Con la fotopolimerización en cubeta, se crea un objeto en una cubeta de un fotopolímero de resina líquida. Un proceso llamado fotopolimerización cura cada capa de resina microfina utilizando luz ultravioleta (UV) dirigida con precisión por espejos [54].

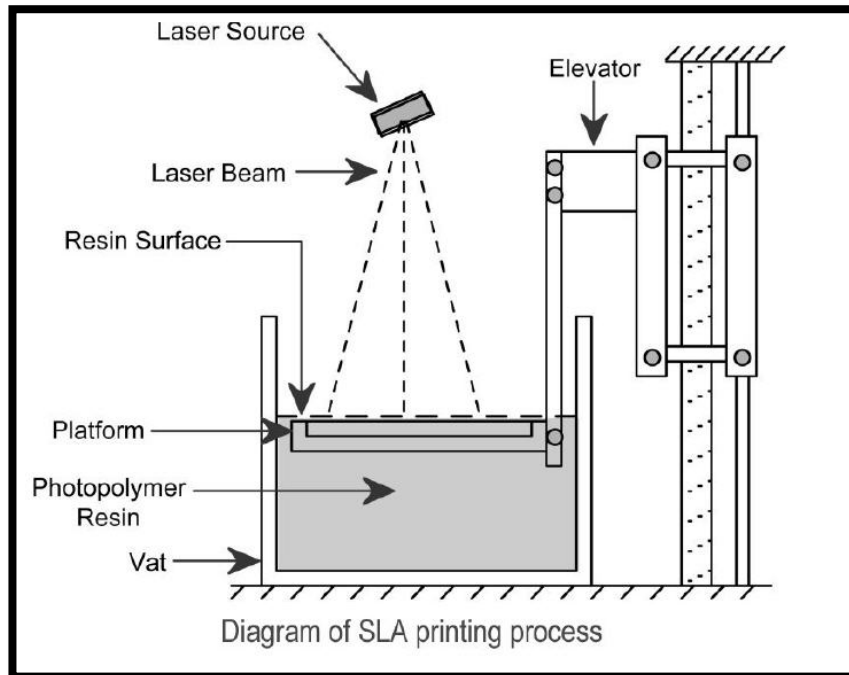


Figura 8-9. Tecnología de Vat Polymerization [55]

8.4 Impresora utilizada en el Proyecto

La impresión del conjunto se ha realizado a través de la tecnología, anteriormente explicada, *Material Extrusion*, debido a las claras ventajas que tiene en relación a los costes y velocidad de impresión. Es por esto que la tecnología *Material Extrusion* es la más utilizada en este sector.

Este proyecto se ha realizado con la impresora Ender Pro i3, y un rollo de material PLA de 1,75 mm de 1 kg. El montaje y puesta a punto ha durado aproximadamente 8h entre dos personas hasta la impresión correcta de la primera pieza.

Esta impresora 3D Ender Pro i3 es diseñada y fabricada por Comgow Co., Ltd, una empresa internacional cuyo compromiso es proporcionar impresoras 3D de alta calidad. Esta impresora es muy popular en todo el mundo, aplicada a amplios campos como el hogar, la educación, ingenierías, tratamientos médicos, diseños de prototipos.



Figura 8-10. Todas las piezas de la impresora Ender Pro i3

Especificaciones de impresión:

- Tecnología de impresión: Fabricación de filamentos fundidos (FFF).
- Volumen de construcción: 200 x200x180mm
- Resolución de la capa: 0.1-0.3mm
- Precisión de posicionamiento: 0.1-0.3mm
- Diámetro del filamento: 1.75mm
- Diámetro de la boquilla: 0.3mm
- Tipo de filamento: ABS / PLA

Software de la máquina:

- Sistema operativo: Windows / Mac / Linux
- Software de control: GT-Host, Repetier-Host, Printron
- Formato de archivo: .STL. Código G

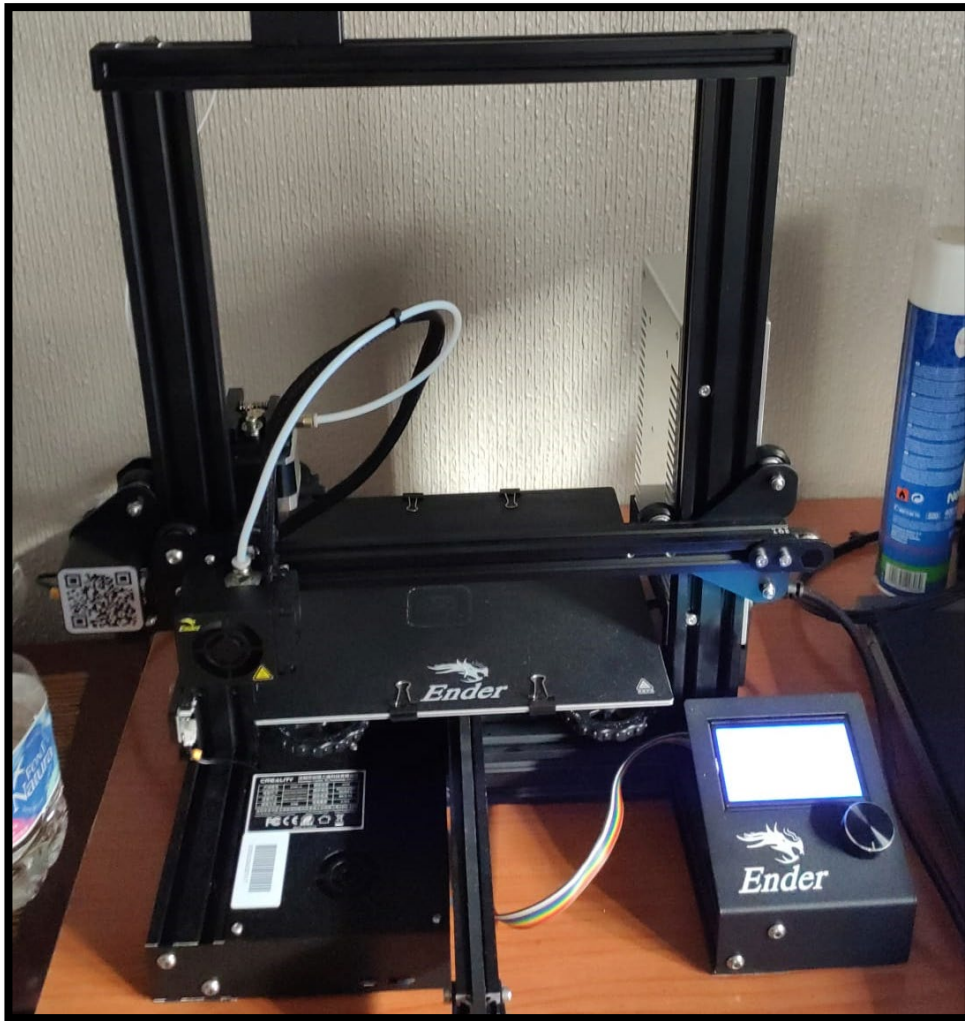


Figura 8-11. Impresora Ender Pro i3 lista para imprimir

Temperaturas admitidas:

- Temperatura máxima de la cama calentada: aproximadamente 110 ° C
- Temperatura máxima del extrusor: aproximadamente 240 ° C

Electrónica de la impresora:

- Fuente de alimentación: entrada: 110VAC / 1.5A o 220VAC / 0.75A
- Salida: DC12V / 15A
- Conectividad: USB, tarjeta SD (soporte de impresión off-line)

Mecánica:

- Cuerpo: Placa acrílica de 8 mm de espesor (negro / transparente)
- Plataforma de construcción: Vidrio de boro silicato + Caldera MK2A XYZ
- Varillas: resistente al desgaste, acero inoxidable
- Motores paso a paso: ángulo de paso de 1.8 ° con 1/16 micro-stepping

- Estructura física: Repelente

Dimensiones físicas y peso:

- Sin carrete: 45 x 44 x 44 cm
- Con carrete: 45 x 44 x 68 cm
- Peso neto: 8,5 kg

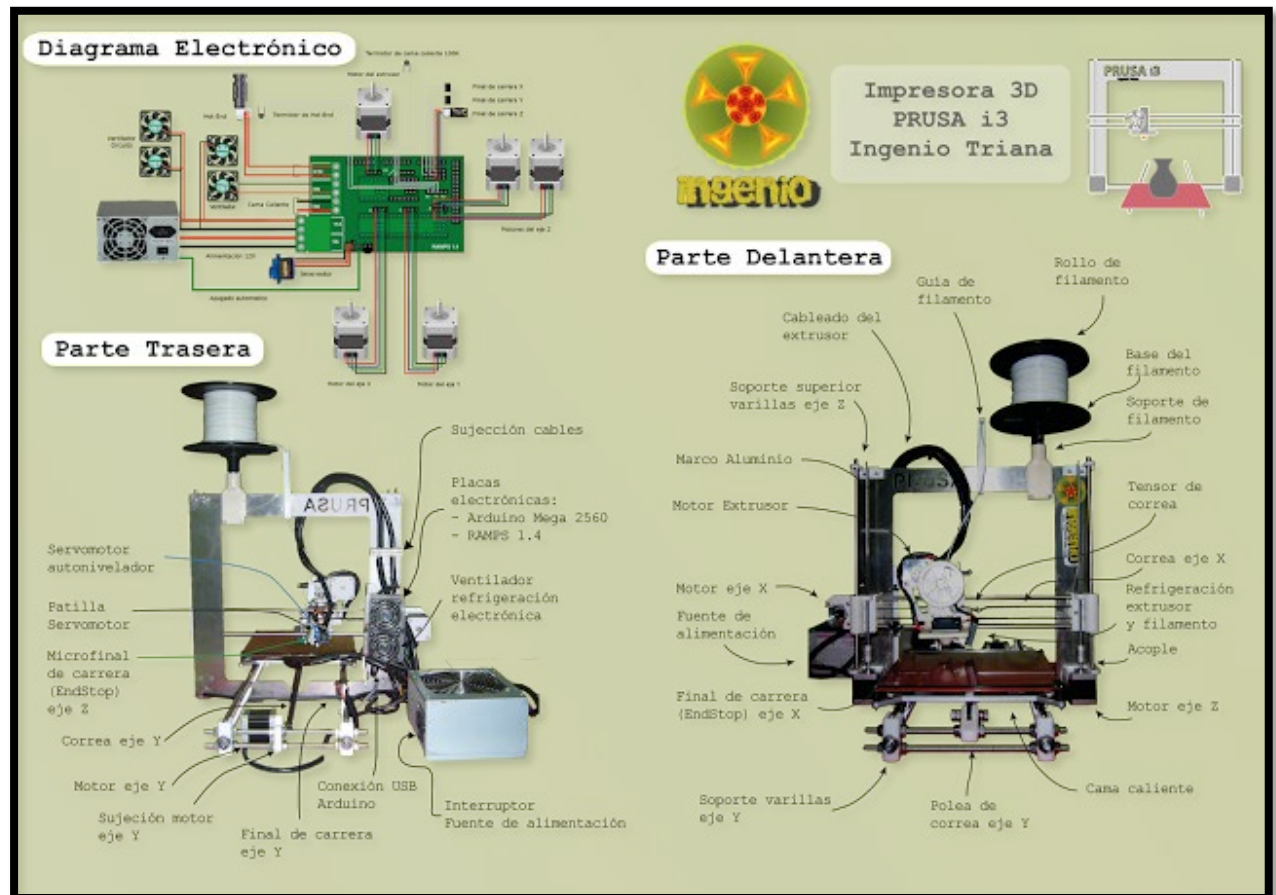


Figura 8-12. Partes de una impresora 3D [56]

8.5 Software CURA

Para poder imprimir en 3D el modelo, antes se tuvo que hacer una conversión del formato nativo de SolidWorks a STL (Standard Triangle Language). Este formato transforma el modelo tridimensional en pequeños triángulos, describiendo solo la geometría de la superficie de un objeto tridimensional sin ninguna representación de color, textura u otros atributos comunes del modelo CAD.

Este formato STL es interpretado por un software compatible y es ahí donde se configuran los parámetros necesarios para una correcta impresión. En el caso de este proyecto, se ha usado el software de código abierto y gratuito CURA.

Cura es uno de los programas de impresión 3D más usados en la actualidad, esto se debe a que es un software libre. Fue creado por David Braam que más tarde fue contratado por Ultimaker para la continuación del software. Este programa es el principal para las impresoras de Ultimaker, pero también se usa en otras

impresoras.

El secreto de su triunfo se debe a su simplicidad, así como a su interfaz intuitiva. Está disponible para Windows, Linux y macOS.

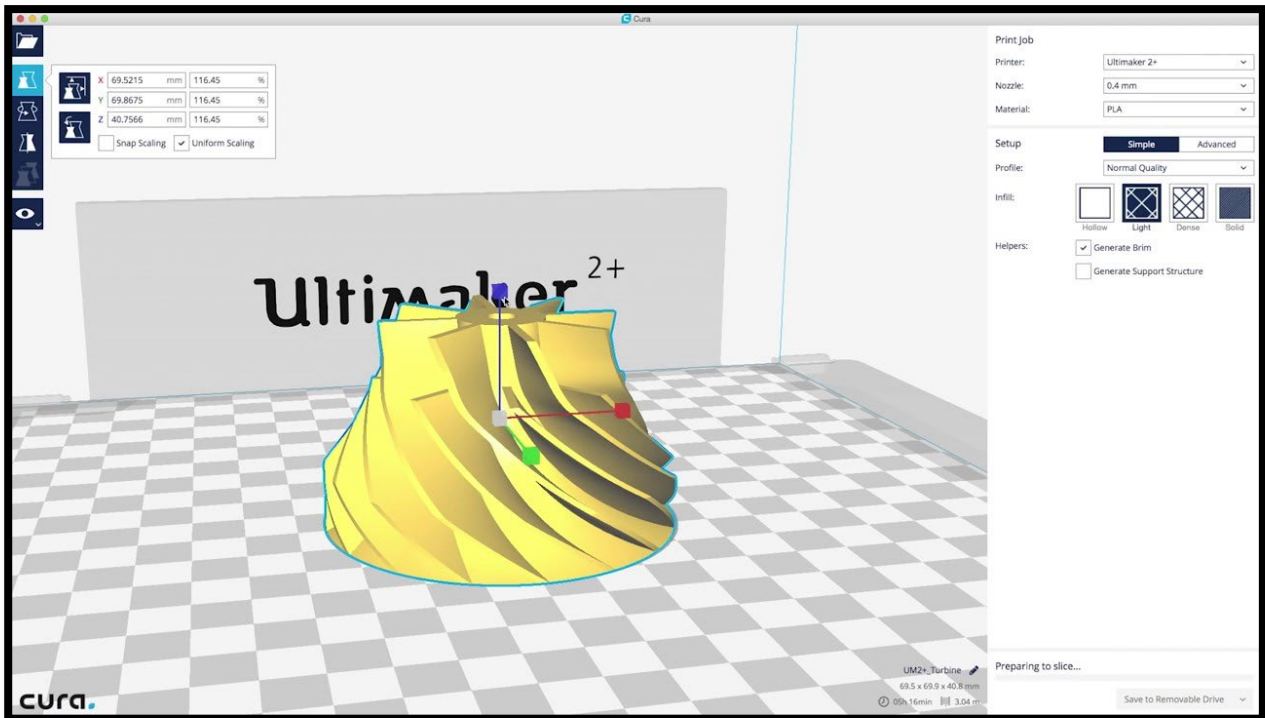


Figura 8-13. Software CURA usado en el proyecto.

En la interfaz de cura se observan 2 barras de manejo, la barra de la izquierda es para ajustes relacionados con la pieza tales como la orientación, la escala, el tamaño, número de piezas y mover. En la barra de la derecha encontramos los ajustes de la impresión, que tiene dos modos. En esta barra se elige el material con el que se va a imprimir.

Cura tiene 2 modos principales. El primero es una configuración predeterminada que solo deja elegir el relleno del mallado interno, utilización de soportes, el material y la calidad del acabado. El segundo es un modo más avanzado que permite elegir una cantidad enorme de parámetros para mejorar la impresión optimizando la impresora.

El segundo método es el método personalizado que es el que se ha utilizado para realizar esta etapa del proyecto ya que la adaptación del software a una impresora distinta de las de Ultimaker lo hace de forma menos eficiente.

En el apartado de calidad se selecciona la altura de la capa, el mínimo es 0.1 mm y el máximo 0.6 mm, con esta opción se puede elegir terminar la pieza antes sacrificando calidad en las capas.

El perímetro se refiere a la superficie exterior de la pieza, eligiéndose típicamente 0.8 mm para la pared y para las partes superiores e inferiores.

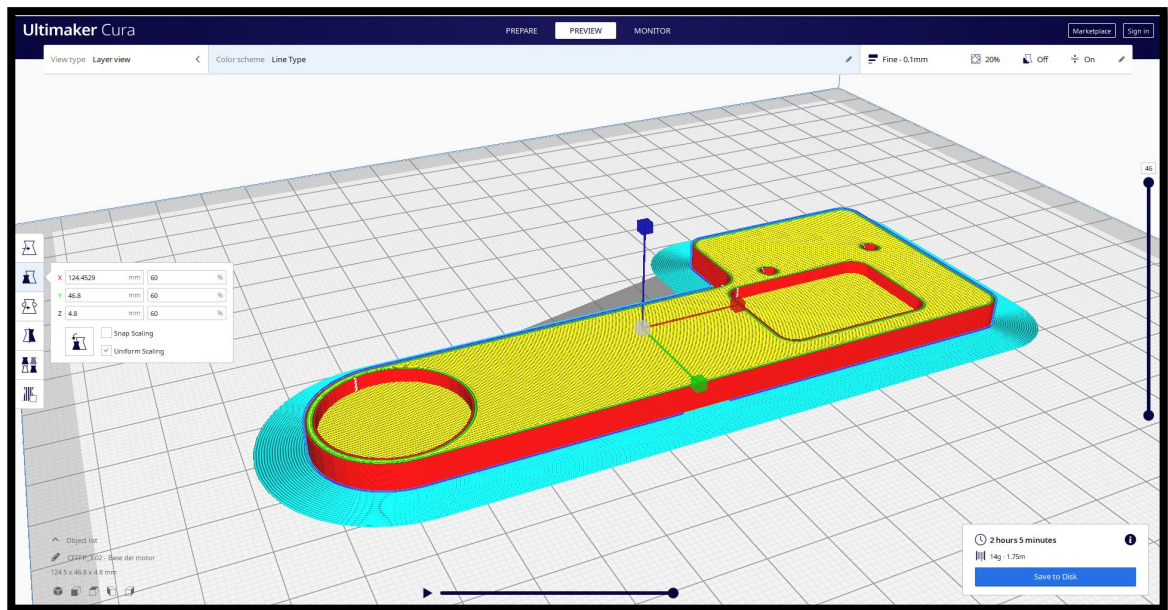


Figura 8-14. Previsualización por capas de la pieza base del motor en CURA

El relleno es uno de los puntos clave donde se puede ahorrar tiempo y materia si se configura correctamente. En esta sección se decide el porcentaje de relleno que tiene la pieza. Habitualmente entre el 10% y el 30% da unos acabados bastante adecuados, otra forma de configurarlo es la separación entre líneas y el porcentaje se decide automáticamente según la distancia elegida.

La elección de un patrón u otro puede marcar una diferencia abismal dependiendo de la posición de la pieza o de su geometría. Aunque es habitual usar rejilla, existen otros patrones que mejoran las estructuras con techos rectos y otras que mejoran las paredes inclinadas. Las más comunes son rejilla, triángulos, cúbicos y panal de abeja.

En el apartado de material se entra más en profundidad en este campo. En esta parte se elige la temperatura de impresión, la temperatura de la placa, el diámetro del material y el porcentaje de flujo para lograr una impresión correcta. También se encuentra una pestaña de retracción que se refiere al movimiento de recogida del filamento en las zonas en las que no hace falta que el extrusor libere material para no dejar unos hilos típicos en el cambio de piezas separadas una distancia pequeña.

8.6 Materiales

Hay una amplia gama de materiales cada uno con sus propias características, fortalezas y debilidades. A veces es difícil elegir el material más adecuado para un proyecto.

A continuación, se muestran los materiales más comunes que se pueden utilizar en las impresoras 3D de escritorio. Para cada material, se han enumerado las características, los pros y los contras.

ABS

El ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) es un polímero a base de petróleo. Es muy resistente a la alta temperatura que hace este material perfecto para los componentes del mundo real. Es un material bastante barato que permite el prototipado rentable. El ABS es el material de acceso para la mayoría de las impresoras 3D. Junto con PLA, es el material más común utilizado para la impresión 3D de escritorio.

Pros:

- Barato
- Altamente disponible con una gran variedad de colores
- Aplicable a casi cualquier impresora
- Resistente mecánicamente
- Una vida más larga

Contras:

- Tóxico
- Requiere cama caliente
- Sufre de pandeo
- No es adecuado para su uso con alimentos [51]

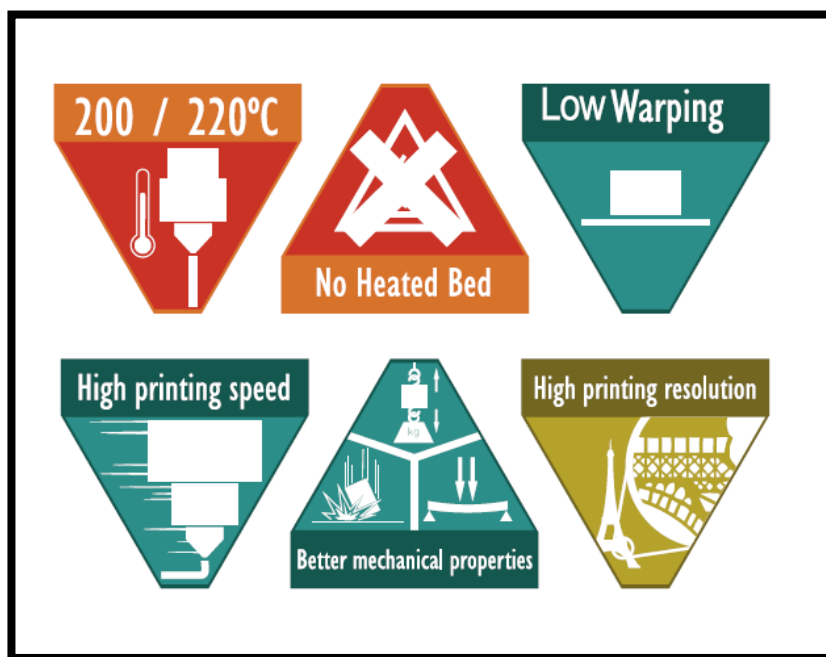


Figura 8-15. Características principales del ABS [57]

PLA

Hecho de recursos renovables, el ácido poliláctico es el material de impresión 3D verde. Tiene un precio moderado en el mercado y tiene varias propiedades deseables y las especificaciones técnicas que lo convierten en el perfecto para aficionados de la impresión 3D.

Debido a que el PLA es más fácil de imprimir que el ABS, suele ser la opción preferida para las impresoras 3D de bajo costo. Se adhiere bien a una base cubierta con pegamento blanco o cinta de pintor azul, lo que significa que no se necesita una cama de impresión con calefacción.

Pros:

- Fácil de imprimir
- Fácilmente disponible en una variedad de colores
- Se puede imprimir en una superficie fría
- Impresión de alta velocidad
- Deformación baja

Contras:

- No muy robusto
- Puede deformarse cuando se expone al calor
- Difícil de post-proceso [57]

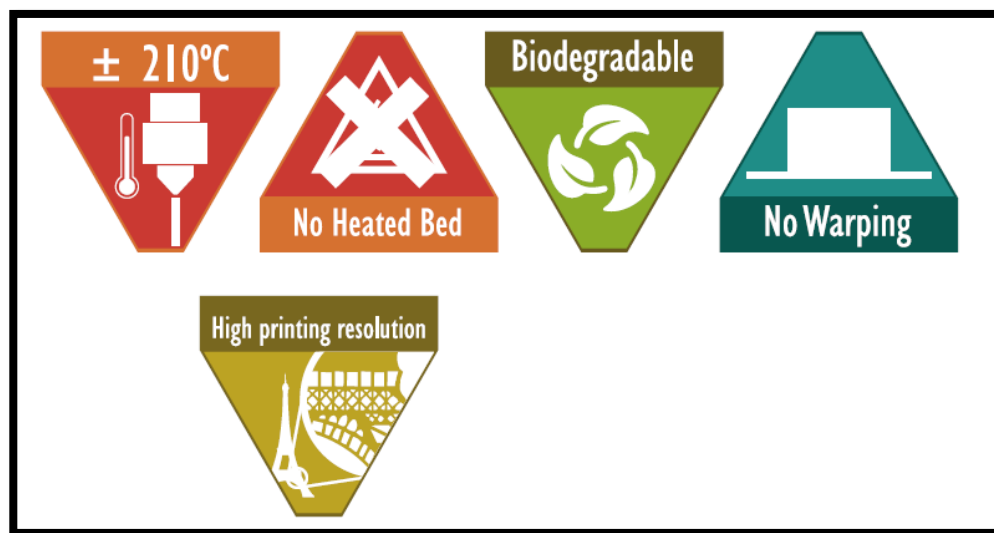


Figura 8-16. Características principales del PLA [57]

Polipropileno (PP)

PP o polipropileno es un plástico utilizado para muchos fines diferentes, como textiles, cuerdas y papelería. También es resistente a múltiples productos químicos y disolventes. PP es uno de los materiales más rentables. La técnica de conformación más común para producir PP es el moldeo por inyección. Se clasifica como uno de los materiales más codiciados en el mundo.

Pros:

- Reciclable
- Resistente a muchos disolventes
- No requiere aparatos complejos de calefacción
- Tieso y fuerte
- Retención de color

- Alta defición de impresión

Contras:

- Impactado por los rayos UV
- Caro (más que PE)
- Deformación pesada
- Difícil de imprimir (muy pocas impresoras lo administran actualmente) [57]

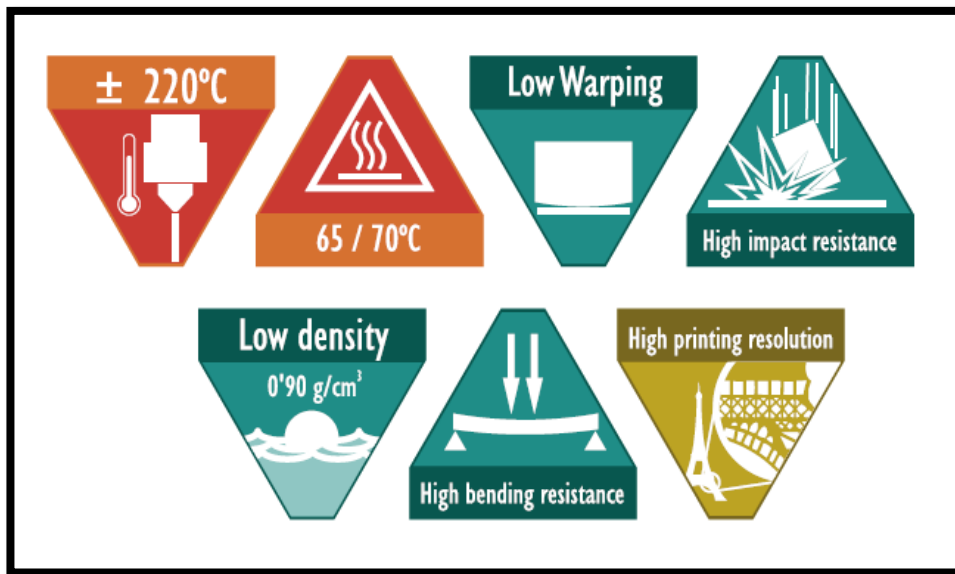


Figura 8-17. Características principales del PP [57]

NYLON

El nylon es un polímero sintético fuerte y durable con un final sedoso translúcido, también llamado plástico blanco. También se vende por un precio moderado que lo hace ampliamente utilizado para la producción de artículos para el hogar.

Pros:

- Alta durabilidad
- Flexible pero fuerte
- Teñido fácilmente dejándolo empapado
- Produce copias suaves
- Resistencia UV y química

Contras:

- Constantemente debe mantenerse seco en recipientes libres de humedad
- La idoneidad de la impresora varía • Puede requerir alteraciones en las impresoras
- Puede caducar

- Los resultados pueden ser imprecisos [57]

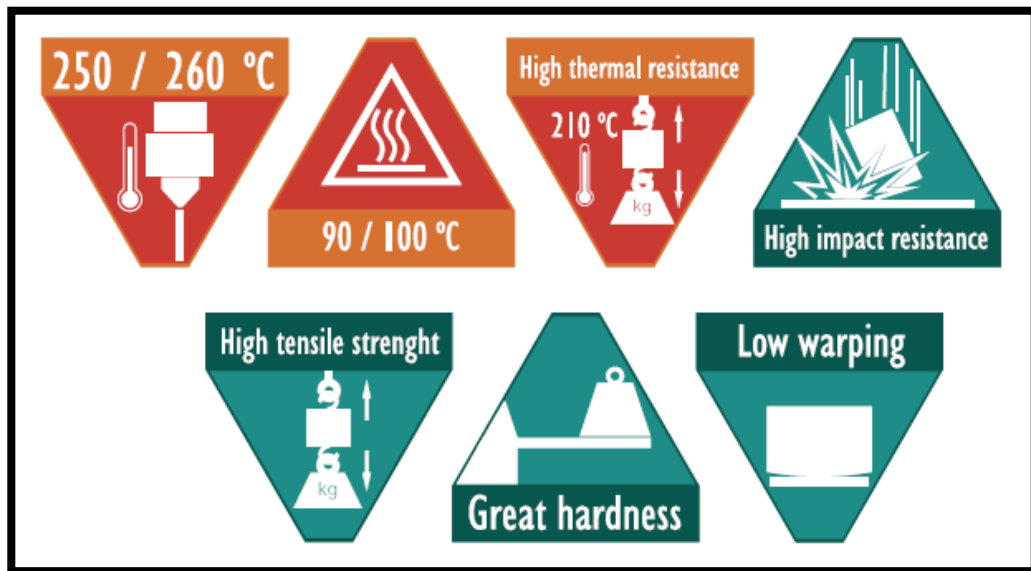


Figura 8-18. Características principales del Nylon [57]

PETG

PET y su material derivado PETG son uno de los materiales más populares del mundo. Incluso si no los conoce por su nombre, definitivamente los ha visto usados en botellas de plástico, en fibra de ropa y en productos de consumo diario. PETG es una versión modificada de PET con diferencias notables.

Pros:

- Deformación baja
- Reciclable
- Fácil de imprimir y tiene buena adherencia a la capa
- Durable
- Puede esterilizarse
- Buena para la contención de alimentos y bebidas

Contras:

- Requiere condiciones de temperatura muy precisas para fabricar la pieza correctamente
- El PET se vuelve frágil por sobrecalentamiento (aunque no por PETG)
- PETG se puede debilitar con luz UV

- Fácil de arañar (más que PLA)

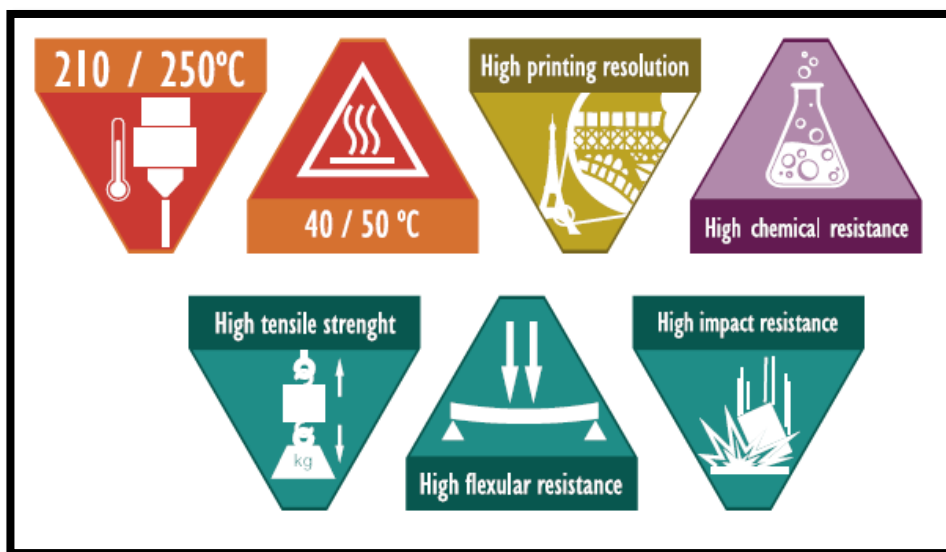


Figura 8-19. Características principales del PETG [57]

El PLA y el ABS son los 2 materiales de impresión 3D más extendidos. Actualmente el PLA tiene dos ventajas principales sobre el ABS: no emite gases nocivos (se pueden tener varias impresoras funcionando en un espacio cerrado y no hay problema) y hay un rango más amplio de colores (fluorescente, transparente, semitransparente...). Se puede imprimir con todo tipo de impresoras (no necesita base de impresión caliente) y se puede imprimir sin base.

Sus inconvenientes respecto al ABS son básicamente dos: no resiste las altas temperaturas (se empieza a descomponer a partir de 50-60 grados centígrados) y el postproceso (mecanizar, pintar y, sobre todo, pegar) es mucho más complicado. Se utiliza básicamente en el mercado doméstico. Los precios de los dos materiales son bastante similares. El mercado de las impresoras 3D personales es muy nuevo y hay dos tendencias opuestas

En este proyecto, se ha decidido tomar como material el PLA, debido a su bajo costo, y buen comportamiento mecánico.

8.7 Consideraciones tomadas en cuenta

En este apartado, se comentará las consideraciones que se han tomado en cuenta para poder imprimir cada pieza, desde la posición, acabados y relleno de material.

8.7.1 Posición

Las impresoras 3D tienen la principal limitación de tener que imprimir sobre una base o sobre una capa anterior. Habitualmente las piezas tienen zonas al aire o también llamadas voladizos, si estos tienen un ángulo menor de 40 grados dará problemas de impresión con total certeza.

Por ello la importancia de posicionar una pieza de la manera más eficiente posible. Con la ayuda de la herramienta de rotación colocaremos la pieza procurando que tenga una menor zona en voladizos. En el caso de no poder colocar la pieza en una posición que no tenga voladizos existe una solución, los apoyos.

Los apoyos son estructuras menos densas que la propia pieza y que sirve de apoyo en las zonas críticas.

Muchas veces son útiles y fáciles de extraer, pero otras veces, aunque hagan correctamente su función de soportar las partes de la pieza, pueden crear un problema extra a la hora de extraerlos o por el acabado superficial que dejan.

Comúnmente se pueden quitar con unos alicates y, posteriormente, limar la pieza sin mayor problema, pero cuando se trata de cavidades pequeñas donde no cabe una cabeza de alicate o partes curvas en las que la lija no puede hacer la presión adecuada dan bastantes problemas a la hora de posicionar.

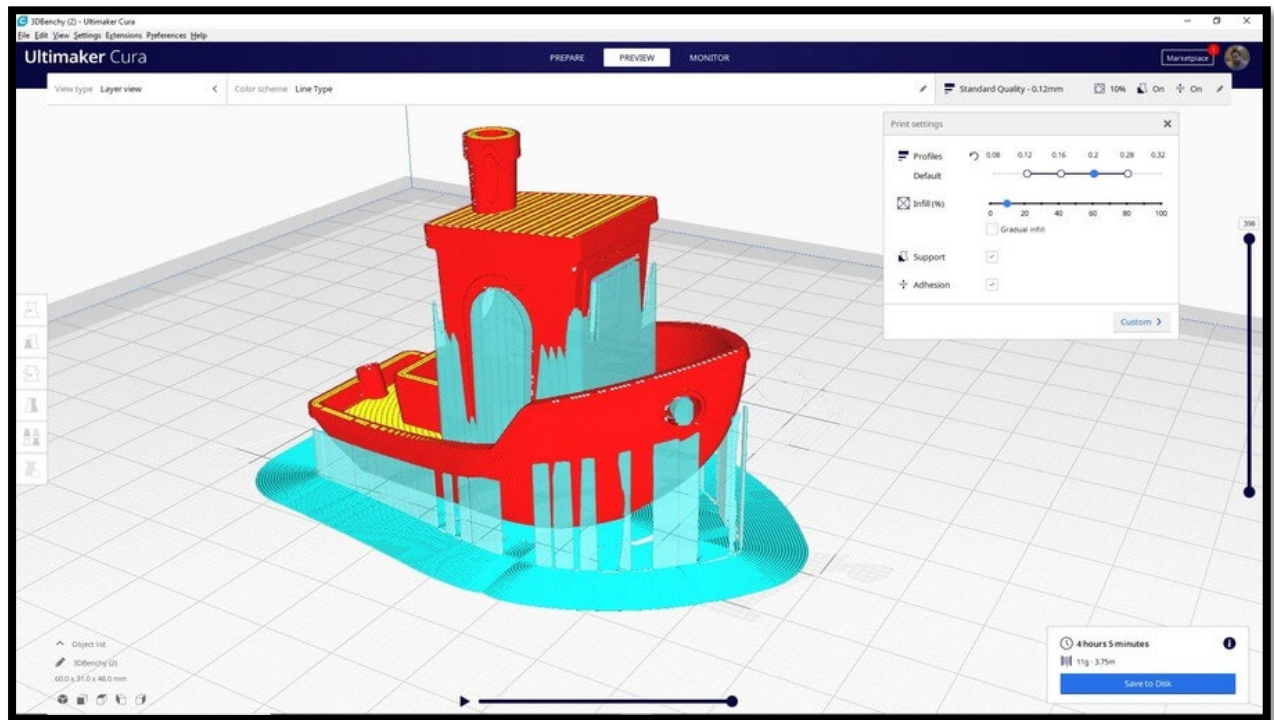


Figura 8-20. Soportes en una figura de ejemplo [58]

La posición en la que se coloca la pieza para imprimir provoca que varíen las propiedades notablemente, también influirá estéticamente en el acabado y, por supuesto, en la correcta impresión. La resistencia de una pieza es notablemente inferior cuando la tensión se aplica de forma transversal a las capas. Por el contrario, si la tensión se provoca de forma longitudinal obtendremos mejor resistencia de la pieza. Así esto para piezas de decoración solo influirá de modo estético, pero para piezas que tengan una función mecánica es un factor que debe tenerse muy en cuenta. Obviamente estos factores se pueden combinar y, es por ello que no es una ciencia exacta la colocación.

En casos que se unan los inconvenientes se busca el compromiso entre lo deseado y la funcionalidad. En las opciones de soporte podemos encontrar 3, ningún soporte, solo los soportes que toque la plataforma o en todas todos los voladizos existentes.

La densidad del soporte es algo que también debe elegirse con cuidado ya que un soporte demasiado denso provoca que la extracción del mismo sea más complicada.

8.7.2 Acabados

Los acabados de las piezas suelen depender principalmente de la velocidad de impresión, de la temperatura del material y del grosor de capa. Por supuesto, depende de la precisión de la máquina. Respecto a la velocidad de la máquina habitualmente los valores rondan los 60 mm/s para el eje X y 120 mm/s para el eje Y. Pero para mejorar la precisión se pueden bajar los valores a la mitad siempre y cuando se haga en proporción a la temperatura.

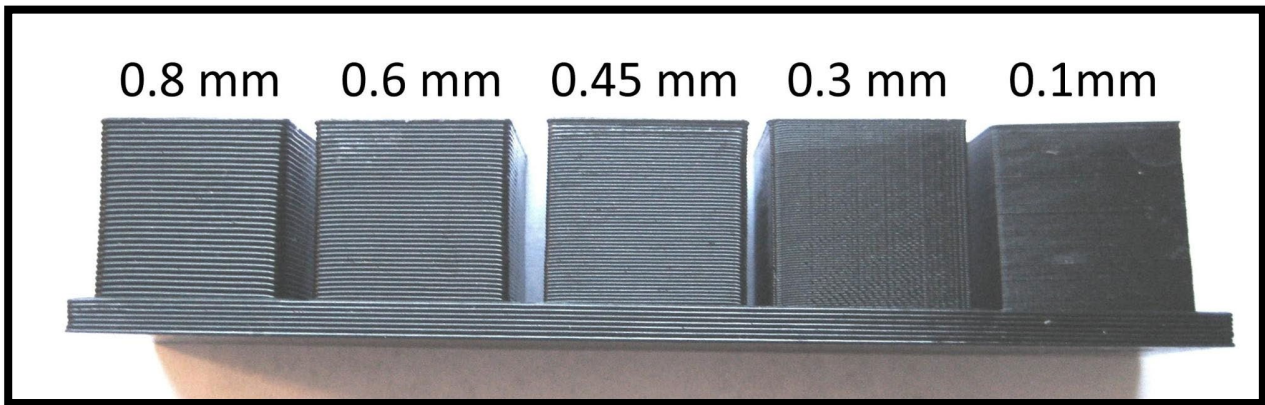


Figura 8-21. Acabado superficial en función de la altura de capas [59]

Una temperatura excesiva única a una velocidad de impresión lenta hará calentar las piezas en exceso en las capas cercanas a las que trabaja y derretirlas generando un acabado deforme.

La altura de capa es un parámetro que produce una gran variación en la superficie de la pieza, como se observa en la imagen una altura mayor da un peor acabado.

8.7.3 Relleno

Este parámetro indica la cantidad de material que estará bajo las superficies de la pieza, siendo 100% un relleno absoluto y 0% hueco. Este último no es nada recomendable debido a que las paredes y los techos no tendrán estructuras que las soporten. El relleno 100% muchas veces es innecesario.

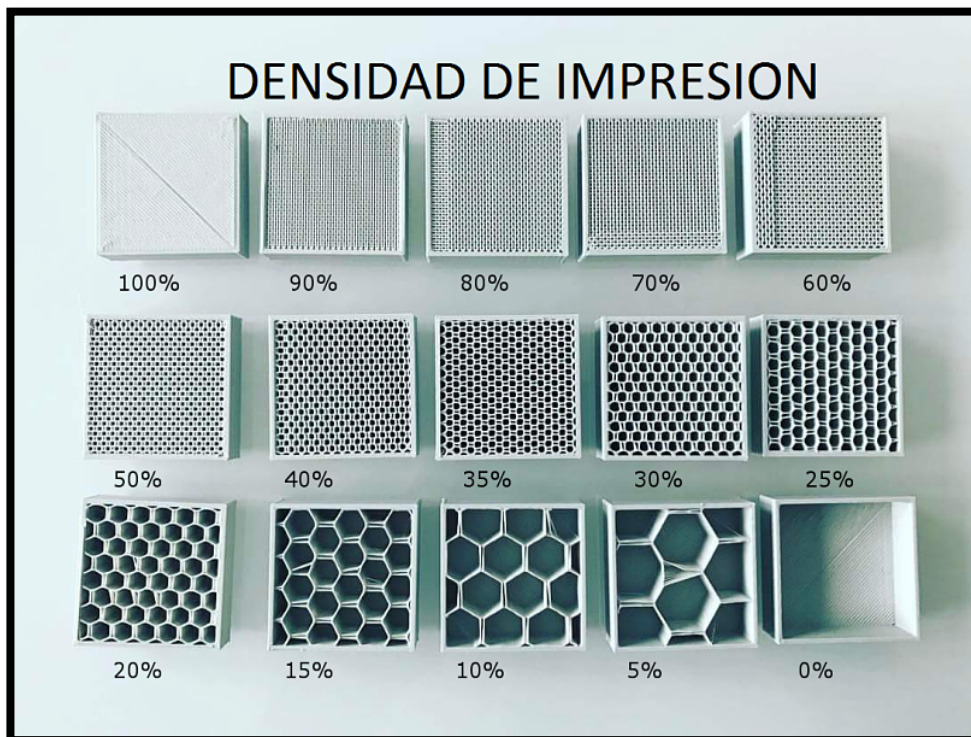


Figura 8-22. Relleno de una pieza en función de la densidad [59]

La estructura interior tiene varios patrones que ayudarán de una forma u otra a las diferentes características de las piezas. Existen patrones circulares, cónicos, rejillas, panal de abeja, tridimensional, etc.

8.8 Resultado final

En este apartado se mostrarán todas las piezas impresas en este Proyecto, las cuales se han tenido que imprimir con una reducción del 40% de su tamaño debido a que no cabían en la impresora.

Las piezas han sido impresas en el material PLA color blanco y rojo. La elección de este material se debe a que no es tan tóxico como el ABS y es de los más utilizados en la industria. Muchas de las piezas móviles del motor no han podido ser impresas debido a que suponía un alto coste económico. Sin embargo, las piezas más importantes del motor sí han sido impresas.



Figure 8-1. Pieza Soporte Cigüeñal impresa en 3D

La altura de capa que se ha utilizado en la impresión de todas las piezas es de 0,2 mm, densidad del 25% y ancho de pared de 3 mm. Con estos parámetros, la calidad de impresión ha sido muy buena.



Figure 8-2. Cilindro de calentamiento impreso en 3D

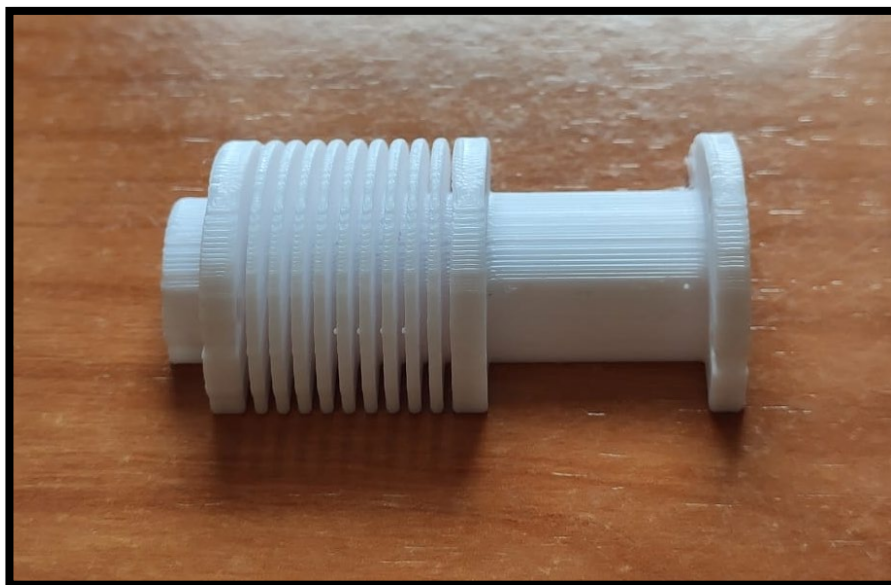


Figure 8-3. Cilindro de Refrigeración impreso en 3D

En el caso de los cilindros, se han impreso solo una mitad para una mejor calidad de los acabados y para que se pueda ver el interior. Los cilindros al ser una pieza difícil de imprimir debido a sus curvas y circunferencias, la calidad del acabado ha sido un poco peor. Sin embargo, puede observarse una buena calidad. En este caso, se imprimieron en color blanco.

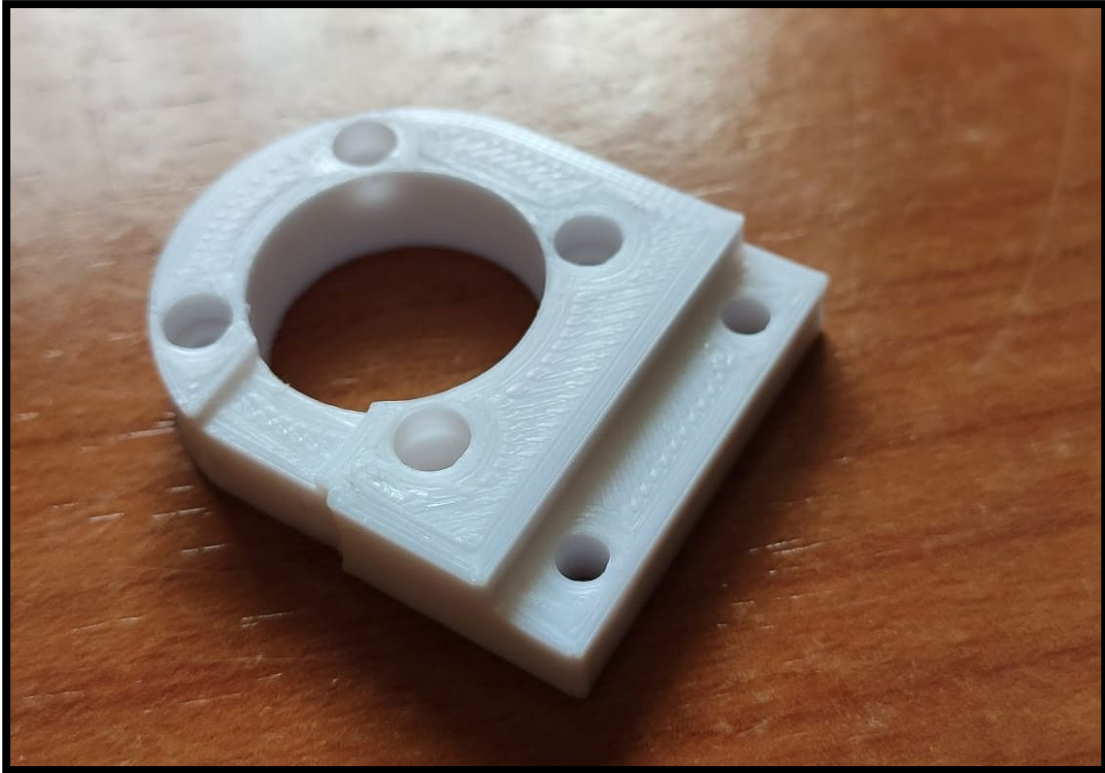


Figure 8-4. Cigüeñal impreso en 3D



Figure 8-5. Volante de inercia impreso en 3D

Tanto el cigüeñal como el volante de inercia se han impreso con los mismos parámetros descritos arriba y el resultado ha sido excelente.



Figure 8-6. Base del motor impreso en 3D

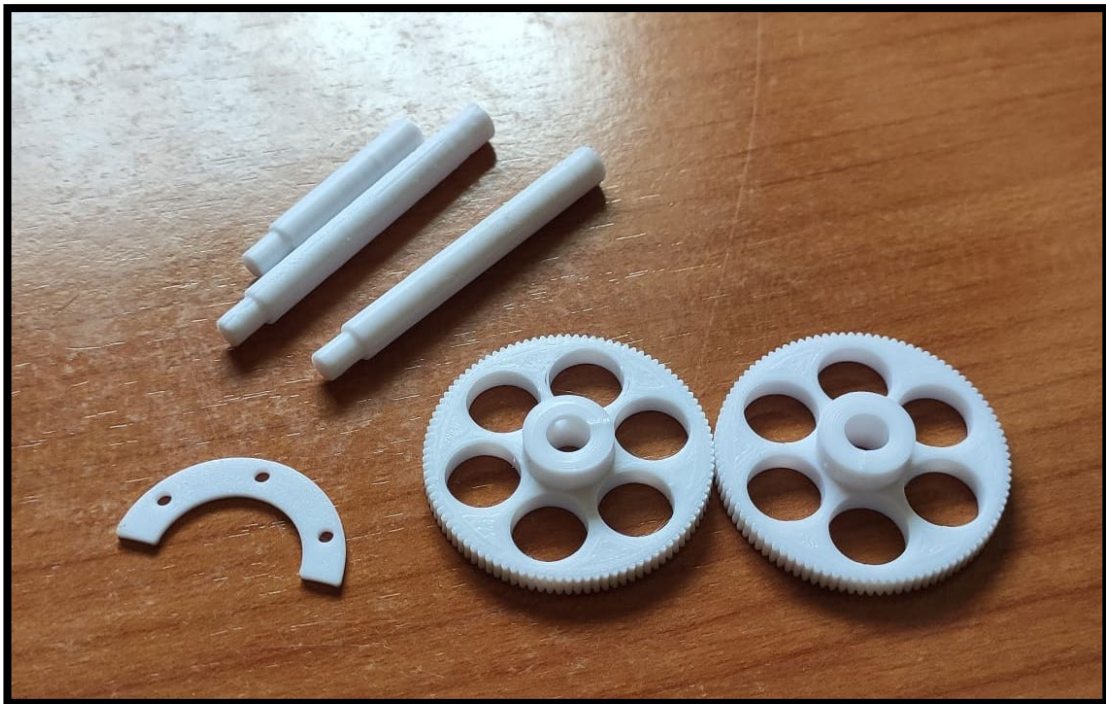


Figure 8-7. Engranajes, bridas y varillas impresos en 3D

En el caso de los engranajes, bridas y varillas se han cambiado los parametros de impresión debido a que son piezas muy pequeñas y requería de una calidad superior. La altura de capa se ha configurado a 0,15 mm y grosor de pared 2,5 mm. Densidad de relleno del 40%. Las piezas han sido impresas de color blanco.

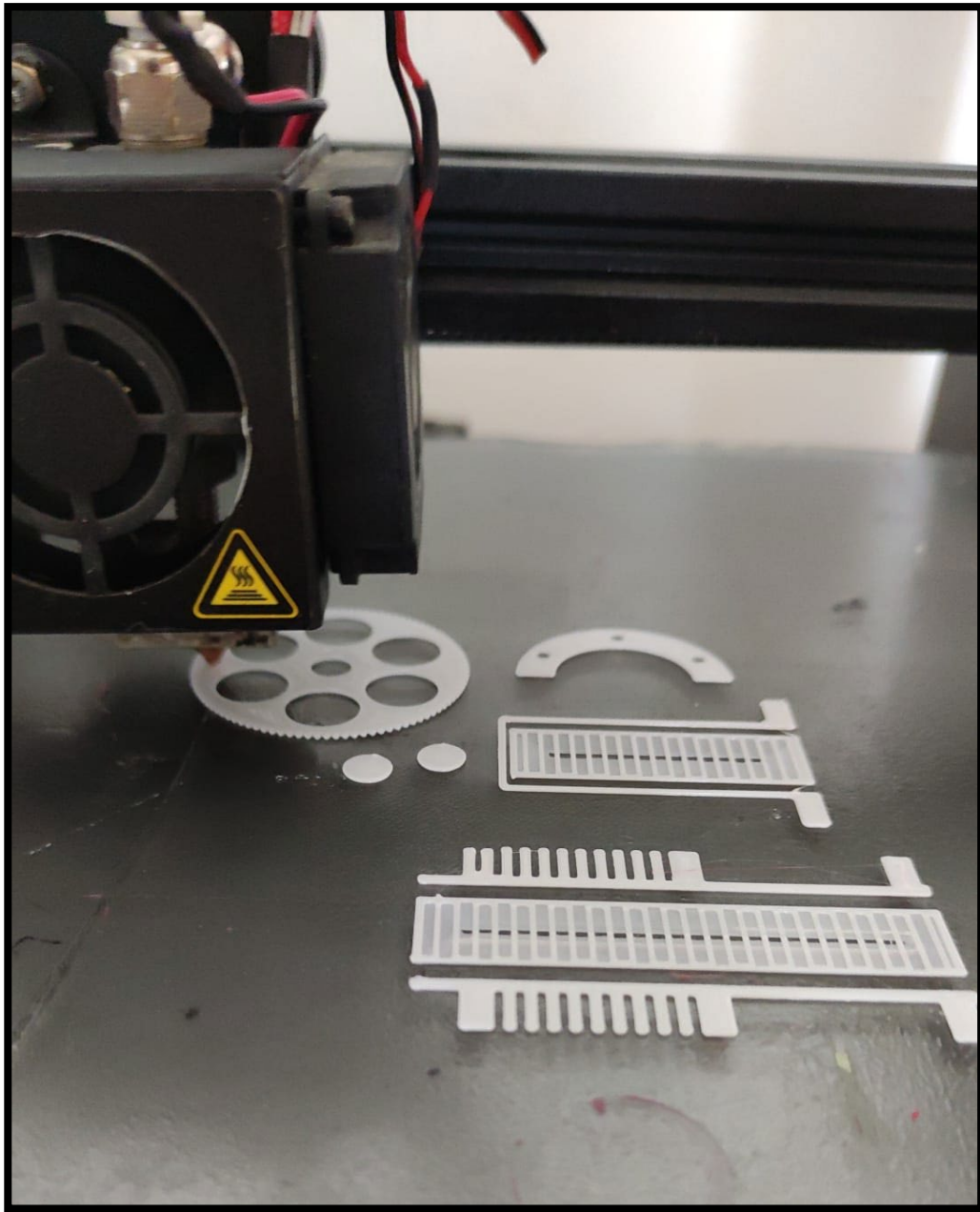


Figure 8-8. Proceso de impresión 3D de varias piezas

El proceso de impresión no ha sido tarea fácil, para imprimir bien una pieza en 3D debe de estar todo en perfecto funcionamiento, tanto correas, calibración de motores, calibración de la cama, temperaturas del nozzle y de la cama, ventiladores, etc. Imprimir en 3D con una impresora sencilla es un proceso que se podría de catalogar como un arte. Es bastante difícil que todo funcione a la primera.

Asimismo, cada pieza ha tardado de media unas dos horas en imprimirse (algunas menos de media hora y otras más de 4 horas), con un coste total de más de 100 gramos de material PLA.

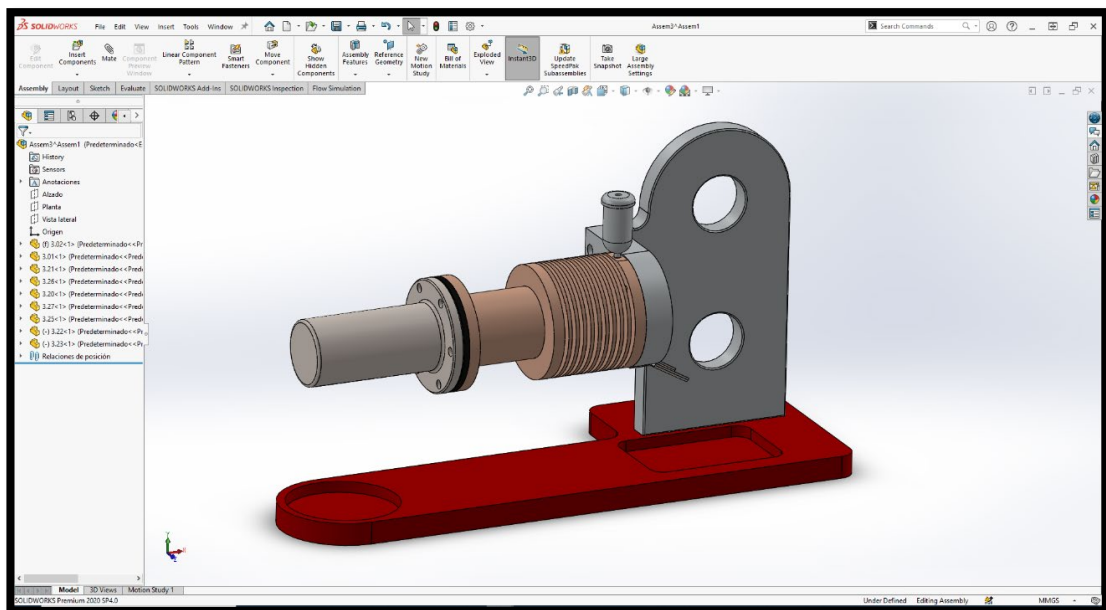
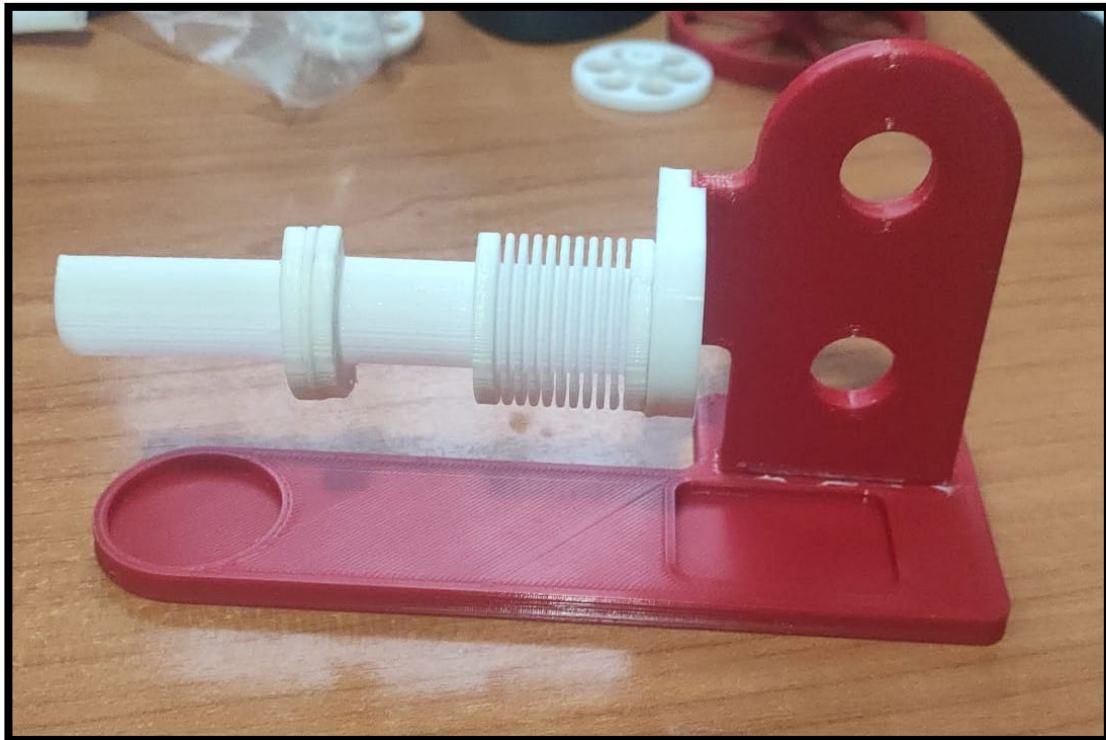


Figure 8-9. Comparación del subconjunto Base del motor en SolidWorks e impreso en 3D

Imprimir el motor completo ha resultado ser imposible debido a que las piezas móviles son extremadamente pequeñas y para que se pudieran hacer se debería tener una precisión que no llega a ser alcanzable por una máquina humilde de fabricación aditiva. Aun así, sí se ha podido imprimir el subconjunto base del motor entero y se ha podido montar todas sus piezas.

Imprimir en 3D, a pesar de que es una tecnología que crece día tras día, es una tarea aún compleja y cara, de ahí a que aun no se vean impresoras 3D en todas las casas como sí hay impresoras en 2D. Sin embargo, sí creo que van por buena dirección y creo que es cuestión de tiempo de que su uso se vuelva común en todas las casas.

9 CONCLUSIONES Y PROYECTOS FUTUROS

El modelado del motor Stirling ha dejado una serie de conclusiones clave que conviene aclarar para una posible elaboración de futuros proyectos. En primer lugar, los planos están basados en la construcción de una maqueta pequeña en acero (en su mayoría). Aunque se ha podido realizar un análisis térmico por elementos finitos, resulta conveniente hacer otros análisis por elementos finitos como un análisis de cargas por fatiga, el cual no se ha podido realizar por falta de tiempo, pero que podría llevarse a cabo para un futuro proyecto.

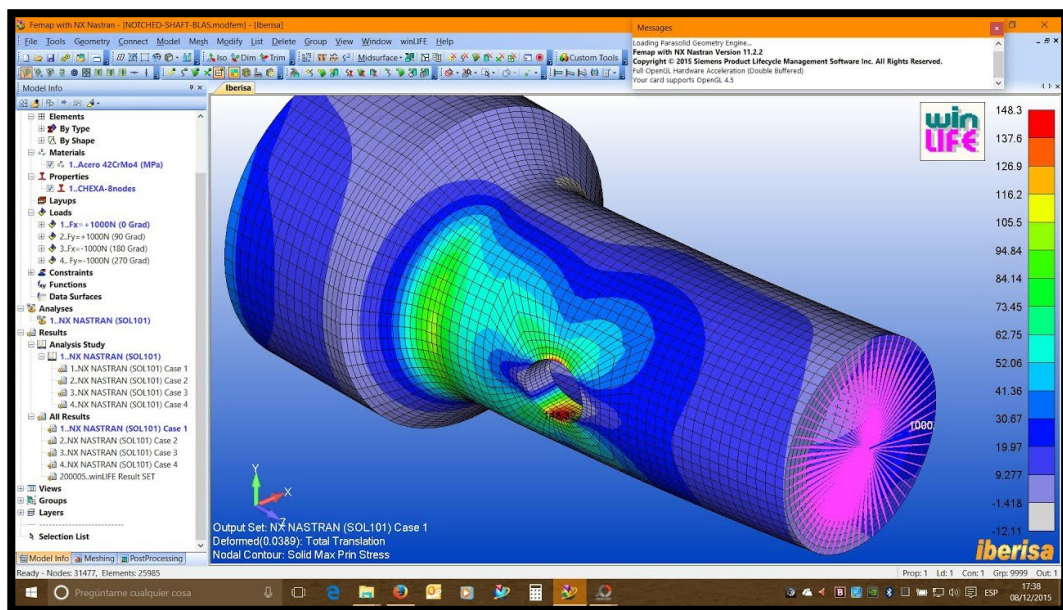


Figura 9-1. Análisis de una pieza por fatiga [60]

Asimismo, faltarían por modelar elementos que resultan esenciales para el funcionamiento del motor, como son las calderas de vapor, ciertas válvulas, reguladores, etc.

El motor, aunque es totalmente funcional, se entiende que su uso sea exclusivo para exposición, pero esto no resta la complejidad de las piezas para la realización de su modelado. Sobre todo, al disponer de muchas piezas involucradas en su cinemática, ha resultado complejo su representación en el software, aunque finalmente se ha logrado con una buena precisión.

Debido a la gran cantidad de recursos que consume la simulación térmica, solo se han podido realizar dos simulaciones del cuerpo no móvil del motor. Sin embargo, para un desarrollo en más detalle, se podría elaborar un estudio termodinámico de todo el motor (incluyendo partes móviles) y con más ensayos.

Una posible ampliación del proyecto podría ser la impresión en 3D del modelo completo en una impresora de fundición de metales, que para el caso de este proyecto queda totalmente fuera del presupuesto económico

dedicado al mismo.

Para el análisis térmico, debido a la gran cantidad de recursos que consume durante el análisis, se ha realizado solo de un subconjunto del motor y no se ha podido del conjunto completo, lo que se podría dejar para un proyecto futuro.

Para concluir, resulta importante recalcar el uso de SolidWorks para la realización de este proyecto, el cual me ha servido de mucho para aprender más sobre este software y de la importancia que tiene para el mundo de la ingeniería mecánica.

REFERENCIAS

- [1] C. Kuang-Hua. *E-Design, computer-Aided Engineering Design*. Massachusetts, USA: Academic Press, 2016
- [2] K. Lalit Narayan, K. Mallikarjuna Rao, M.M.M. Sarcara. *Computer Aided Design and Manufacturing*. Nueva Delhi: Prentice Hall of India Private Ltd., 2008
- [3] Diseño de un manillar de una bicicleta. ALL3DP. Disponible en: <https://all3dp.com/2/best-free-solidworks-viewers/> [Acceso: 20-dic-2020]
- [4] La eolípila. BRITANNICA. Disponible en: <https://www.britannica.com/technology/aeolipile> [Acceso: 20-dic-2020]
- [5] Imagen de la primera máquina de vapor. WIKIPEDIA. Disponible en: <https://cutt.ly/KzKKGd0> [Acceso 20-dic]
- [6] F. Betz. Managing Science. *Methodology and Organization of Research*. New York: Springer, 2012
- [7] Steam Engine machine. BRITANNICA. Disponible en: <https://www.britannica.com/technology/steam-engine> [Acceso: 22-dic-2020]
- [8] The 1698 Savery Steam Pump - the first commercially successful steam powered device, built by Thomas Savery. WIKIPEDIA. Disponible en:
https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_steam_engine#/media/File:Savery-engine.jpg [Acceso: 22-dic-2020]
- [9] History of steam engine. WIKIPEDIA. Disponible en:
https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_steam_engine#cite_note-23 [Acceso: 14-ene-2021]
- [10] Máquina de vapor de Newcomen. WIKIPEDIA. Disponible en:
https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_steam_engine#/media/File:Newcomen_Figuier.jpg [Acceso: 15-ene-2021]
- [11] Máquina de vapor de James Watt. WIKIPEDIA. Disponible en:
https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_steam_engine#/media/File:Watt_steam_pumping_engine.JPG [Acceso: 19-ene-2021]

- [12] W. Rosen. *The Most Powerful Idea in the World: A Story of Steam, Industry and Invention*. Chicago University Press, 2012.
- [13] A. Nuvolari, B. Verspagen. *Technical choice, innovation and British steam engineering, 1800-1850*. Academic Press, 2009.
- [14] Structures of Change in the Mechanical Age. ARCHIVE. Disponible en:
<https://archive.org/details/structuresofchan0000thom/page/82/mode/2up> [Acceso: 27-feb-2021]
- [15] The Stirling Engine of 1816. HOTAIRENGINES. Disponible en:
<http://hotairengines.org/closed-cycle-engine/stirling-1816> [Acceso: 27-feb-2021]
- [16] Stirling Engine. WIKIPEDIA. Disponible en:
https://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine#cite_note-5 [Acceso: 27-feb-2021]
- [17] Patente presentada por Robert Stirling. WIKIPEDIA. Disponible en:
https://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine#/media/File:Robert_Stirling's_engine_patent.gif [Acceso: 27-feb-2021]
- [18] Stirling, un motor cuyo 'combustible' es sólo calor. HIBRIDOSYELÉCTRICOS. Disponible en:
<https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/stirling-un-motor-cuyo-combustible-es-solo-calor/20130226180646004970.html> [Acceso: 27-feb-2021]
- [19] Fuentes de energía renovable. OTOVO. Disponible en: <https://www.otovo.es/blog/energia/que-son-las-energias-renovables/> [Acceso: 27-feb-2021]
- [20] Are Engines the Future of Solar Power?. SCIENTIFICAMERICAN. Disponible en:
<https://www.scientificamerican.com/article/are-engines-the-future-of-solar-power/> [Acceso: 27-feb-2021]
- [21] The Maricopa Solar Plant Project, USA. POWERTECHNOLOGY. Disponible en: <https://www.power-technology.com/projects/maricopasolarplantar/> [03-mar-2021]
- [22] Maricopa Solar. MARICOPA. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=_rl1H-53Mks&ab_channel=hgpauction123 [03-mar-2021]
- [23] Planos del motor Stirling. UMH. Disponible en: <http://dibujotecnico.edu.umh.es/category/conjunto-motor-stirling/> [03-mar-2021]

- [24] Imagen de un diseño de una viga en SolidWorks 4IENG. Disponible en: <https://www.4ieng.com.br/single-post/6-passos-para-sua-primeira-simulacao-no-solidworks> [03-mar-2021]
- [25] A Brief History Of SolidWorks. SCAN2CAD. Disponible en: <https://www.scan2cad.com/cad/solidworks-history/> [03-mar-2021]
- [26] Flywheel. WIKIPEDIA. Disponible en: <https://en.wikipedia.org/wiki/Flywheel> [17-mar-2021]
- [27] P. Lafont, A. Díaz, J. Echávarri, *Diseño y calculo por engranajes*. Dextra, 2013.
- [28] Thermodynamic Theory of the Ideal Stirling Engine. MIDE. Disponible en: <https://blog.mide.com/thermodynamic-theory-of-the-ideal-stirling-engine> [17-mar-2021]
- [29] Imagen del ciclo termodinámico de un motor Stirling. FISICAEXP. Disponible en: <https://fisicaexpdemostrativos.uniandes.edu.co/MotorStirling.html> [17-mar-2021]
- [30] C. Gómez. *Termodinámica. Segundo curso de grados en Ingeniería*. Universidad de Sevilla, 2008.
- [31] Finite element method. WIKIPEDIA. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method [17-mar-2021]
- [32] Visualization of how a car deforms in an asymmetrical crash using finite element analysis. WIKIPEDIA. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method#/media/File:FAE_visualization.jpg [17-mar-2021]
- [33] Thermal conduction. WIKIPEDIA. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_conduction [04-abr-2021]
- [34] Convection (heat transfer). WIKIPEDIA. Disponible en: [https://en.wikipedia.org/wiki/Convection_\(heat_transfer\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Convection_(heat_transfer)) [04-abr-2021]
- [35] Radiación térmica. WIKIPEDIA. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Radiaci%C3%B3n_t%C3%A9rmica [04-abr-2021]
- [36] J.F. Coronel, *Colección de Tablas, Gráficas y Ecuaciones de Transmisión de Calor*. Grupo de Termotecnia Dpto. de Ingeniería Energética, Universidad de Sevilla, 2014.
- [37] L. Jyothish Kumar, P.M. Pandey, D. Ian Wimpenny. *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*. Springer Singapore, 2019.

- [38] Additive Manufacturing in Product Development Processes. INDUSTRYTODAY. Disponible en: <https://industrytoday.com/additive-manufacturing-in-product-development-processes/> [04-abr-2021]
- [39] Historia de la impresión 3D. MED3. Disponible en: <https://me3d.com.au/2018/history-of-3d-printing/> [27-abr-2021]
- [40] La historia de la impresión 3D: tecnologías de impresión 3D desde los años 80 hasta la actualidad. SCULPTEO. Disponible en: <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/basics-of-3d-printing/the-history-of-3d-printing/> [27-abr-2021]
- [41] Imagen de línea de temporal de los avances de la impresión 3D. RSC. Disponible: <https://pubs.rsc.org/en/content/chapterhtml/2019/bk9781788014403-00001?isbn=978-1-78801-440-3&sercode=bk> [27-abr-2021]
- [42] Additive Manufacturing Research Group. Powder Bed Fusion. LBORO. Disponible en: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/> [05-jun-2021]
- [43] Powder Bed Fusion (PBF). RESEARCHGATE Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Overview-of-the-Powder-Bed-Fusion-manufacturing-process-Distributors-of-PBF-machines-use_fig5_336745862 [05-jun-2021]
- [44] Guía completa: Binder Jetting o Inyección Aglutinante. 3DNATIVES. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/inyeccion-aglutinante-te-lo-contamos-23032016/#!> [07-jul-2021]
- [45] Tamizado de Polvos de Fabricación Aditiva Binder Jetting. RUSSELL. Disponible en: <https://www.russellfinex.com/es/industrias/fabricacion-aditiva-am/tamizar-materiales-impresion-3d-binder-jetting/> [07-jul-2021]
- [46] About Additive Manufacturing. Directed Energy Deposition. LBORO. Diponible en: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/directedenergydeposition/> [07-jul-2021]
- [47] Directed Energy Deposition. SICIENCEDIRECT. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/directed-energy-deposition> [07-jul-2021]
- [48] About Additive Manufacturing. Material Extrusion. LBORO. Disponible en: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialextrusion/> [12-jul-2021]

[49] Material Extrusion. RESEARCHGATE. Disponible en:

https://www.researchgate.net/figure/Basic-working-principle-of-material-extrusion-printing_fig1_334546324
[12-jul-2021]

[50] About Additive Manufacturing. Material Jetting. LBORO. Disponible en:

<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialjetting/> [12-jul-2021]

[51]. Material Jetting. RESEARCHGATE. Disponible en:

https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-the-material-jetting-process_fig3_325876280
[12-jul-2021]

[52] About Additive Manufacturing. Material Jetting. LBORO. Disponible en:

<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialjetting/> [12-jul-2021]

[53] Sheet Lamination (SL) Technology. 3DPRINTING. Disponible en:

<http://www.3dprinting.lighting/3d-printing-technologies/sheet-lamination/> [12-jul-2021]

[54] About Additive Manufacturing. VAT Photopolymerisation. LBORO. Disponible en:

<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/vatphotopolymerisation/#> [19-jul-2021]

[55] Vat Polymerization. WHITECLOUDS. Disponible en:

<https://www.whiteclouds.com/3DPedia/vat-polymerization.html> [19-jul-2021]

[56] Partes de una impresora 3D. VEROSAEZ. Disponible en:

<http://verosaez11.blogspot.com/2017/04/impresion-3d.html> [19-jul-2021]

[57] A. Hinojosa. *Smart Materials 3D. FICHAS TÉCNICAS, DATA SHEETS*, 2017.

[58] Imagen de los soportes a una pieza en el software CURA. ULTIMAKER. Disponible en:

<https://of3lia.com/ultimaker-cura/> [19-jul-2021]

[59] Altura de capas. 3DWORKS. Disponible en:

<https://www.3dworks.cl/post/altura-de-capas> [19-jul-2021]

- [60] Fatiga Multiaxial con FEMAP y NX Nastran. IBERISA. Disponible en: <https://iberisa.wordpress.com/2015/12/08/winlife-4-0-multiaxial-fatigue-analysis-with-femap-nx-nastran/> [19-jul-2021]

