



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño y estudio energético
del maquinado de un motor
didáctico**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Luis Gustavo García Conejo

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Vicente Borja Ramírez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

Agradecimientos

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, por formarme como ingeniero y darme las herramientas necesarias para ser un agente de cambio en la sociedad.

Al Dr. Vicente, por la confianza depositada en mí, por dejarme volar libre.

Al Dr. Álvaro Ayala, sinodal y asesor de éste trabajo, por el apoyo brindado en la etapa de manufactura en el LMA.

Al Ing. Miguel Ángel Hernández Alcántara, por su apoyo en las distintas etapas del trabajo.

El trabajo reportado en esta tesis fue financiado por la Universidad Nacional Autónoma de México a través del proyecto DGAPA PAPIIT IT01718.

Dedicatorias

A mis padres, Gustavo y Marilú, ejemplo y fuerza de mi vida.

A mis hermanos: Charly, Danna y Jesús.

A mi familia, donde una página no sería suficiente para agradecerles.

A mis amigos, que hacen de la vida una canción.

Resumen

En el campo de la enseñanza de la ingeniería se requiere constante reinención para mantenerse adaptados a las necesidades y retos que implican. Específicamente, el enfoque adoptado por la Facultad de Ingeniería de la UNAM, donde se desarrollan proyectos que integran los conocimientos adquiridos en otras asignaturas, así como se promueve el trabajo en equipo en asignaturas como Diseño y Manufactura Asistidos por Computadora (CAD-CAM) buscan proyectos que acerquen al alumno a entornos reales.

El diseño y estudio energético del maquinado de un motor didáctico tiene como objetivo el desarrollo de un motor de vapor, que usa aire comprimido como fluido de trabajo. El motor se realizó en el centro de maquinado EMCO VMC-300 sobre una pieza de trabajo de aluminio, donde la mayoría de las piezas del motor se obtuvieron en una sola sesión de maquinado CNC.

En la etapa de diseño conceptual, se proponen soluciones basadas en los requerimientos y especificaciones obtenidos de las máquinas y herramientas usadas, así como las reglas de operación del Laboratorio de Manufactura Avanzada de la Facultad de Ingeniería.

Posteriormente, en el apartado de ingeniería de detalle se desarrolla la solución que cumple con los criterios de bajo costo, fácil manufactura, número de componentes realizados sobre la misma pieza de trabajo en una misma sesión de maquinado, fácil ensamble y atractivo visual. Se definen dimensiones, configuración de componentes y planeación de la manufactura.

Luego, se generaron trayectorias de maquinado que requirieran un mínimo tiempo y pocas líneas de código. Se probaron tres distintas configuraciones de los componentes del motor sobre la pieza de trabajo, así como estrategias de corte que resultaron en un cuarto modelo que incluye el cambio de geometría en los componentes.

Se generaron tres configuraciones que se manufacturaron y probaron, siendo la sexta elegida como el modelo final. Para el maquinado del modelo final se usó una solera de aluminio como pieza de trabajo, una de material de sacrificio, dos cortadores verticales de 1/4" y 3/16", una broca de 1/8" y una broca de centros #1.

Posteriormente se realizó un análisis de sustentabilidad mediante el software *Sustainable Minds*®. De éste se obtuvo el impacto ambiental del motor a través de las emisiones de CO₂ y la comparativa en milipuntos entre los motores realizados en trabajos anteriores.

Finalmente, se concluye de este trabajo las ventajas en tiempo de manufactura que representa el modelo propuesto, la influencia del fresado en el aumento de costos, las oportunidades de mejora respecto a los métodos de unión, y el impacto ambiental que implica el uso de un centro de maquinado para la manufactura del prototipo.

Contenido

1.- Introducción	8
2.- Descripción del problema.....	9
2.1.- Definición del problema	9
2.2.- Objetivos	11
2.3.- Alcances.....	11
2.4.- Proceso de trabajo	12
3.- Antecedentes	13
3.1.- Motor de vapor	13
3.2.- Manufactura Asistida por Computadora (CAM)	15
3.2.1.- Conceptos.....	15
3.2.2.- El fresado.....	16
3.2.3.- Taladrado	18
3.2.4.- Parámetros de maquinado.....	19
3.2.5.- Manufactura en NX 10®	21
3.3.- Evaluación ambiental del ciclo de vida	25
3.3.1.- <i>Sustainable Minds</i> ®	26
3.3.- Trabajos previos	28
4.- Diseño conceptual	30
4.1.- Identificación de necesidades	30
4.2.- Especificaciones	32
4.4.- Propuestas de diseño anteriores	33
4.5.- Propuestas de solución	37
5.- Ingeniería de detalle.....	42
5.1.- El motor	42
5.2.- Diseño del motor	44
5.2.1.- Soporte vertical	45
5.2.2.- Camisa	49
5.2.3.-Pistón.....	51
5.2.4.- Manivela.....	51
5.2.5.- Volante de inercia	52
5.2.6.- Soporte horizontal.....	55

5.2.7.- Flecha	56
5.2.8.- Motor ensamblado.....	56
5.3.- Generación de trayectorias de maquinado y prototipado	57
5.3.1.- MD1.....	58
5.3.2.- MD2.....	58
5.3.3.-MD3.....	59
5.3.4.- MD4.....	61
5.3.5.- MD5.....	66
5.4.- Modelo final – MD6	69
5.4.1.- Rediseño de componentes.....	69
5.4.2.- Generación de trayectorias y selección de herramientas.....	70
5.4.3.- Fabricación	72
6.- Análisis de sustentabilidad	77
7.- Conclusiones	82
Referencias.....	84
Anexos	86
Anexo A.- Planos.....	86
Anexo B.- Cuadro de características de generación de trayectorias.....	92
Anexo C.- Cuadros descriptivos de etapa de manufactura	93

1.- Introducción

La enseñanza en la ingeniería es un campo que requiere reinventarse constantemente, puesto que se ve forzada a seguir el ritmo del desarrollo tecnológico. Así mismo, se requiere el uso de estrategias que mantengan al estudiante motivado y participe del proceso de aprendizaje, de manera que a través de la práctica se asimilen los conceptos clave.

Por otro lado, la infraestructura universitaria no iguala el crecimiento de la población estudiantil. De esta situación surge la necesidad de usar eficientemente los recursos disponibles como instalaciones, maquinaria, entre otros.

El presente trabajo desarrolla un proyecto para la asignatura de Diseño y Manufactura Asistidas por Computadora (*CAD-CAM*) incluida en el plan de estudios de las carreras de ingeniería mecánica y mecatrónica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Tal proyecto se fabricó principalmente por operaciones realizadas en un centro de maquinado de control numérico, en el Laboratorio de Manufactura Avanzada (LMA) de la Facultad de Ingeniería. Al mismo tiempo se realiza un estudio energético, que permita visualizar las emisiones de dióxido de carbono durante el proceso de manufactura y permite comparar contrabajos anteriores.

El trabajo consta de siete capítulos:

En el capítulo dos, descripción del problema, se encuentra la justificación del trabajo, los objetivos y alcances del trabajo y la metodología empleada en la realización del presente.

En el capítulo tres, antecedentes, se exponen los temas que fundamentan el escrito, permitiendo al lector sintonizarse con la temática tratada.

En el capítulo cuatro, diseño conceptual, se desarrolla el proceso de recopilación de necesidades y establecimiento de requerimientos, así como la evaluación y esbozo del concepto a materializarse como solución.

En el capítulo cinco, ingeniería de detalle, se muestra el desarrollo del motor de vapor y de sus componentes en las etapas de diseño y manufactura. Así como las iteraciones realizadas y prueba de prototipos.

En el capítulo seis, análisis de sustentabilidad, se encuentra el estudio energético de emisiones de dióxido de carbono, así como la comparativa con un modelo optimizado para emisiones de carbono.

Finalmente, en las conclusiones se encuentran los resultados del escrito, sus debilidades y fortalezas y las oportunidades de un trabajo a futuro.

2.- Descripción del problema

2.1.- Definición del problema

En las carreras de ingeniería mecánica y mecatrónica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM es impartida la materia de Diseño y Manufactura Asistidos por Computadora, que tiene por objetivo conocer y aplicar herramientas para el análisis interdisciplinario en el diseño y manufactura, utilizando tecnologías de diseño, manufactura e ingeniería asistidos por computadora (CAD-CAM-CAE) (UNAM, 2010). El estudiante, al cursar la asignatura, plasma las habilidades y los conocimientos adquiridos durante el transcurso de la carrera a través del desarrollo de proyectos. Estos se encuentran delimitados por el tiempo, costo y acceso a máquinas herramientas para manufactura.

Por lo cual, la asignatura requiere de proyectos integradores, que se adapten a la estrategia de aprendizaje basado en proyectos, que se apoya en los siguientes lineamientos (ITESM, 2004):

- Contenidos presentados de una manera realista, unificada e investigados a profundidad. Siendo de esta manera relevante y de interés para los participantes.
- Aprendizaje en escenarios realistas, coordinación de habilidades entre los participantes y resolución de problemas complejos.
- Condiciones que favorezcan la colaboración, el trabajo en equipo y el desarrollo de habilidades sociales relacionadas con la negociación, la presentación y manipulación de la información.

De igual manera, se busca dar seguimiento al proyecto durante todo el proceso, desde la concepción de la idea hasta la fabricación y pruebas del modelo final. Considerando el acceso actual que posee un alumno de licenciatura que curse la asignatura, se encuentra restringido al uso de las máquinas herramientas del Laboratorio de Manufactura Avanzada (LMA) y del laboratorio de manufactura.

En trabajos anteriores (Corella & Ramírez, 2011), se propone el desarrollo de un motor de simple efecto como primer proyecto en la asignatura, pues cumple con los requisitos anteriores. Sin embargo, los diseños presentados usan piezas fabricadas en distintas máquinas herramientas, extendiendo la etapa de manufactura y considerando que se tiene disponibilidad de uso de las máquinas del laboratorio de manufactura de la Facultad de Ingeniería.

En el cuadro 2.1, se encuentra la declaración de la misión considerada en esta tesis, que incluyó una guía para la organización y desarrollo del proyecto:

Descripción del proyecto: Motor didáctico de aire comprimido fabricado mayormente por operaciones de fresado	
Descripción del prototipo	Motor funcional de fácil manufactura y ensamble, realizado con operaciones de fresado, que usa aire comprimido como fluido de trabajo.
Objetivos principales	Diseñar un motor didáctico de bajo costo, con la menor cantidad de componentes. La manufactura debe realizarse en las máquinas de la Facultad de Ingeniería.
Mercado primario/dirigido a	Estudiantes de licenciatura en ingeniería que cursen la asignatura de Diseño y manufactura asistidos por computadora.
Mercado secundario	Estudiantes de otras asignaturas donde se requiera el desarrollo de un proyecto integrador.
Suposiciones/restricciones	Antecedentes en diseño mecánico (mecanismos, mecánica de sólidos, dibujo mecánico e industrial) Uso de máquinas herramientas. Participación e interés de los alumnos participantes. Profesores y técnicos auxiliares disponibles para facilitar el uso de la máquina herramienta.
Involucrados	Profesores de asignatura, personal del Laboratorio de Ingeniería Mecánica Asistido por Computadora (LIMAC), alumnos de la asignatura.

Cuadro 2.1 Declaración de misión a desarrollar

2.2.- Objetivos

Diseño de un motor de vapor que use aire como fluido de trabajo, cuyas piezas sean fabricadas por operaciones de fresado en el centro de maquinado EMCO VMC-300, basándose en trabajos anteriores, adaptándose a las necesidades de los alumnos que cursan la asignatura de Diseño y manufactura asistidos por computadora.

2.3.- Alcances

Los alcances son:

- Estudio de diseños de motores en diversas fuentes: publicaciones, videos, semestres anteriores de CAD-CAM (2011-2018), etcétera.
- Diseño de detalle (lista de partes y planos).
- Lista de materia prima y herramental necesarios para manufactura de motor.
- Simulación de maquinado considerando el controlador de una máquina CNC.
- Código CNC.
- Evaluación de la sustentabilidad del motor empleando el software *Sustainable Minds®*.
- Fabricación y prueba de prototipo funcional.

2.4.- Proceso de trabajo

El proceso de trabajo seguido para la realización del presente se basó en el método de innovación de productos (Borja & Ramírez, 2006), que consta de las etapas siguientes (fig. 2.1):

- Identificación de necesidad: se identificó la oportunidad de mejora en el proyecto de motor de aire, se revisaron los trabajos previos, se buscó retroalimentación con alumnos inscritos en la asignatura y se investigó acerca de estrategias para la mejora del diseño en el motor. Se establecieron los requerimientos del proyecto.
- Especificaciones del proyecto: en esta etapa se establecieron parámetros definidos para los requerimientos del producto, basados en trabajos previos, maquinaria disponible, reglas del lugar de trabajo.
- Diseño conceptual: se estudió un trabajo previo, donde se llegó a un modelo optimizado de motor de aire. Se eligió una propuesta de diseño que cumple con los requerimientos y especificaciones obtenidos en las etapas anteriores.
- Ingeniería de detalle: se realizaron los modelos sólidos en software de diseño y manufactura asistido por computadora, se planeó y realizó las simulaciones de manufactura. Se hicieron los planos del motor y sus componentes.
- Prototipado y prueba: el motor se manufacturó, ensambló y se realizaron pruebas de funcionamiento. Se tomó nota de la etapa de manufactura y su desempeño.
- Estudio de sustentabilidad con *Sustainable Minds®*: se introdujeron al software datos de los componentes del motor como el material, el peso de la materia prima, los procesos de manufactura usados y el peso del material removido en estos procesos. Se obtuvo una comparativa respecto a diseños previos, así como los impactos al medio ambiente.

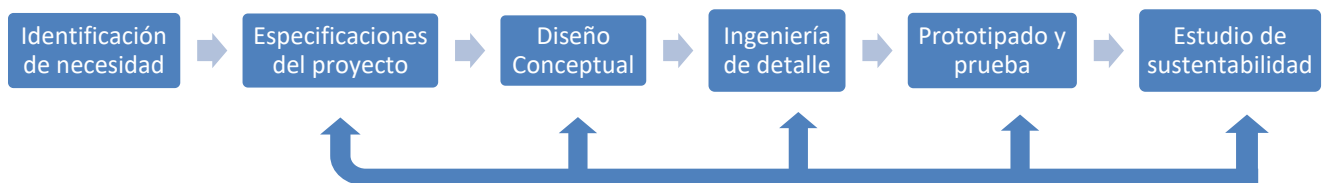


Figura 2.1 Método usado.

3.- Antecedentes

3.1.- Motor de vapor

El motor de vapor es una máquina que transforma la presión ejercida por el fluido de trabajo en movimiento rotacional, mediante mecanismos, que pueden ser reciprocantes, turbinas, entre otros (Touger, 2006).

En el mecanismo manivela-biela-corredera, el pistón recibe la energía cinética del vapor, ocasionando el desplazamiento de éste; este punto se conoce como punto muerto inferior. La acción del volante de inercia lo hace realizar la carrera en sentido contrario; a este punto se le conoce como punto muerto superior. Su funcionamiento queda definido por los siguientes procesos termodinámicos (UNAM, 1988) (ver figura 3.1):

1-2 Proceso isobárico, donde ocurre la admisión del vapor. El paso es directo de la fuente de suministro.

2-3 Proceso isoentrópico de expansión del vapor, realizando el trabajo del ciclo. Comienza con la presión de admisión hasta la presión de escape.

3-4 Proceso isobárico de expulsión de vapor hacia el exterior de la camisa. Cierta cantidad de trabajo es absorbida por el cilindro.

4-1 Proceso isoentrópico correspondiente al cierre de válvulas de escape y compresión del vapor residual.

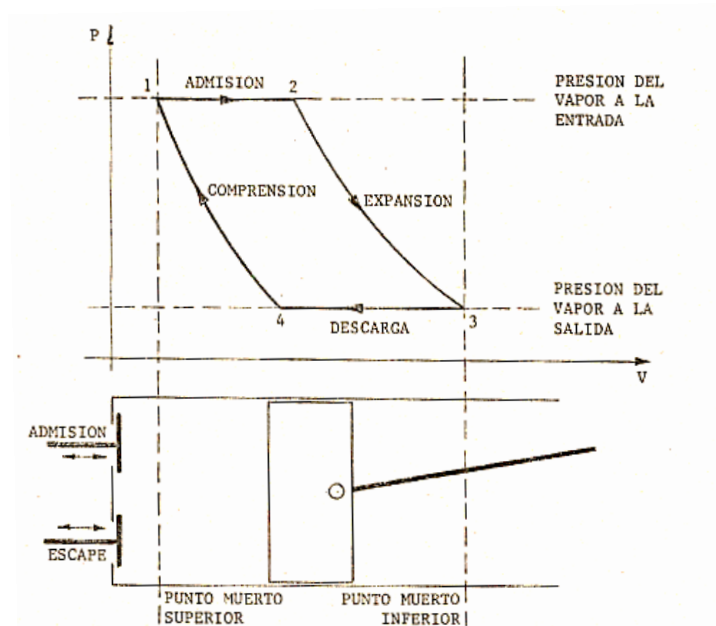


Figura 3.1 Diagrama de ciclo y esquema camisa-pistón (UNAM, 1988)

El mecanismo manivela-biela corredera, presenta distintas inversiones (Fig. 3.2). En el inciso C de la figura 3.2 se encuentra la configuración donde la camisa gira sobre sí misma.

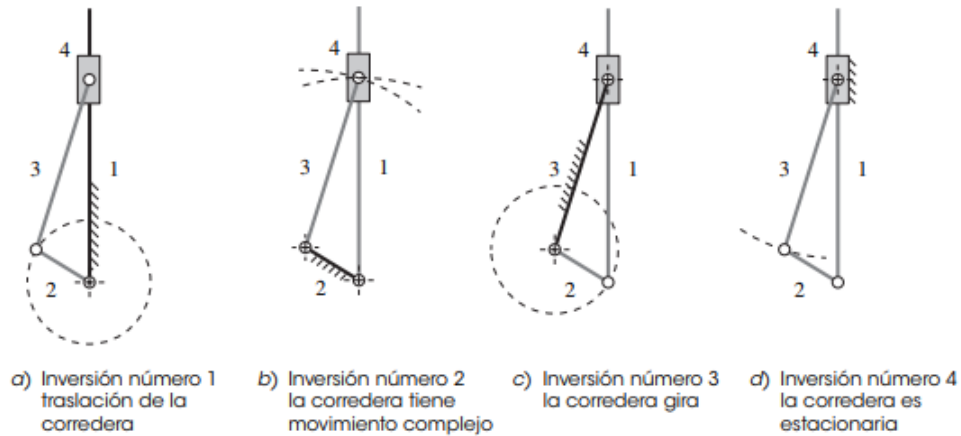


Figura 3.2 Inversiones de mecanismo manivela biela (Norton, 2000).

La inversión mostrada del mecanismo manivela biela corredera que aparece en la figura 3.3, se conoce como motor de simple efecto, pues a diferencia del motor de doble efecto, esta configuración no requiere de válvulas que conmuten la entrada y salida del aire comprimido, simplificando el modelo y requiriendo menor cantidad de componentes. Un ejemplo de motor simple efecto se muestra en la figura 3.3.



Figura 3.3 Motor de simple efecto derivado de inversión en mecanismo

Para el presente trabajo se usa aire comprimido como fluido de trabajo, debido al riesgo que implica trabajar con altas temperaturas del vapor, además de la pérdida de practicidad en el ejercicio didáctico, debido a la infraestructura necesaria para el uso de vapor de agua. El cambio de vapor a aire comprimido conlleva una disminución en la eficiencia del motor, debido a los procesos que requieren de la expansión del fluido de trabajo. Sin embargo, el objetivo del proyecto no se ve comprometido, pues el uso de aire permite el funcionamiento del motor.

3.2.- Manufactura Asistida por Computadora (CAM)

CAM son las siglas en inglés de Manufactura Asistida por Computadora. Según Chennakesava (2009) se puede definir como "el uso de sistemas de computación para planificar, administrar y controlar operaciones de un plan de manufactura mediante el uso directo o indirecto de una interfaz de cómputo con los recursos de producción de la planta".

3.2.1.- Conceptos

La manufactura, según Groover (2010), es la aplicación de procesos físicos y químicos para alterar la geometría, propiedades y/o apariencia de un material dado para realizar partes o productos. La manufactura incluye el ensamble de múltiples partes para la realización de productos. Los procesos de manufactura incluyen combinaciones de maquinaria, herramienta, energía y trabajo físico (figura 3.4).

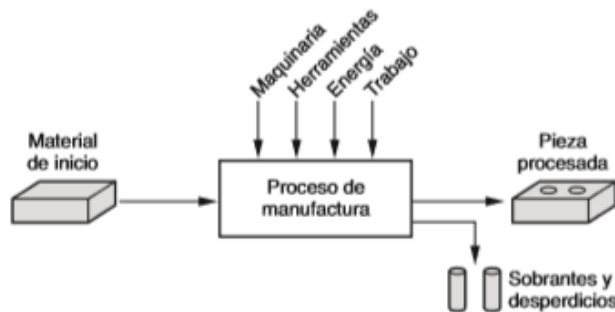


Figura 3.4 Manufactura definida como un proceso técnico (Groover, 2010).

Un proceso de manufactura es un procedimiento que provoca cambios en la materia prima, con el fin de obtener un producto final e incrementar su valor. En general, los procesos se llevan a cabo mediante operaciones de manufactura, que representan una serie de pasos requeridos para transformar a la materia prima en un producto final. Las operaciones se pueden dividir en dos categorías:

- Operaciones de procesamiento: transforman la materia prima de su estado actual a un estado más cercano al producto final.
- Operaciones de ensamble: relacionados con la creación de ensambles y subensambles de dos o más componentes mediante su unión.

En la figura 3.5 se observan las clasificaciones de operaciones de manufactura:

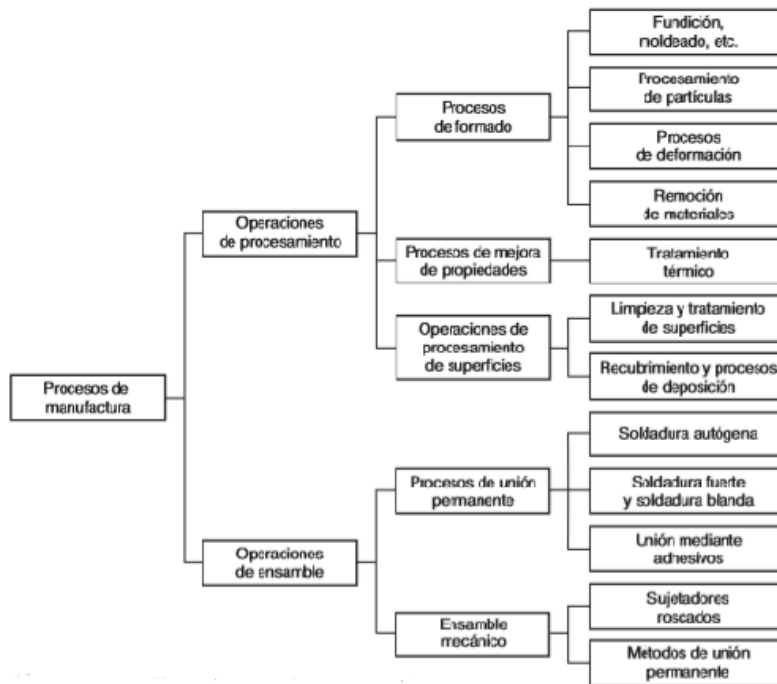


Figura 3.5 Clasificación de procesos y operaciones de manufactura (Groover, 2010).

3.2.2.- El fresado

El fresado es un proceso de manufactura donde la pieza de trabajo se mueve respecto a una herramienta de corte cilíndrica con múltiples bordes cortantes. Se diferencia del taladrado por la dirección del avance: en general, el fresado presenta un avance perpendicular al eje de giro de la herramienta (Groover, 2010).

Primeramente, las operaciones de fresado se pueden clasificar en dos: periférico y plano. El fresado periférico (figura 3.6, izq.) se caracteriza por ubicar el eje de giro paralelo a la superficie a maquinarse; mientras que el fresado plano (figura 3.6 dcha.) se caracteriza por tener el eje de giro perpendicular a la superficie a maquinarse.

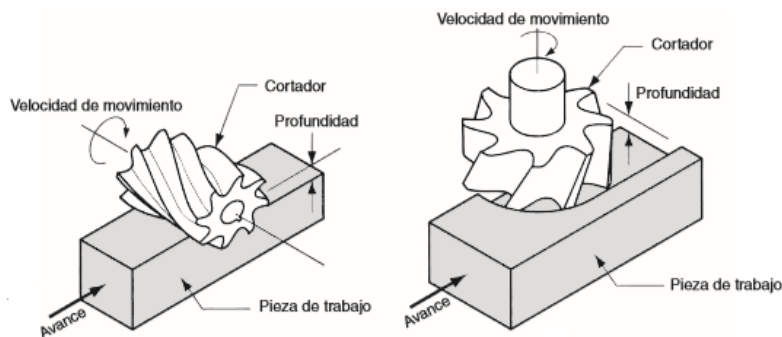


Figura 3.6 Fresado periférico y fresado plano (Groover, 2010).

En cuanto al fresado plano, Groover (2010) clasifica las operaciones realizadas por el fresado planar mostradas en la figura 3.7.

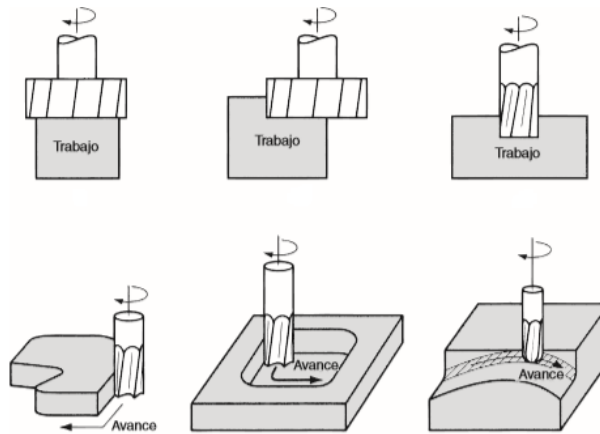


Figura 3.7 Operaciones de fresado planar (Groover, 2010). De izquierda a derecha y de arriba abajo: fresado frontal convencional, fresado frontal parcial, ranurado, fresado de contorno externo, fresado de perfil o cavidad y fresado de contorno de superficie.

Adicionalmente, existen operaciones llamadas fresado por inmersión o *plunge milling* (fig. 3.8 izq.), donde el corte es realizado por el extremo de la herramienta. A diferencia del fresado planar, donde el corte es realizado por el extremo final de la herramienta y la periferia de ésta (Sandvik Coromant, 2019).

El fresado por inmersión tiene como característica el cambio en la dirección de las fuerzas de corte, de dirección radial a dirección axial. Esta modificación logra mayor rigidez en la herramienta, puesto que en general las máquinas herramientas presentan (Sandvik Coromant, 2019). Debido al aumento de rigidez en la herramienta, se puede realizar la operación a mayor velocidad. Sin embargo, el fresado por inmersión deja un acabado rugoso, debido al tipo de corte se generan escalones de material (figura 3.8 dcha.).

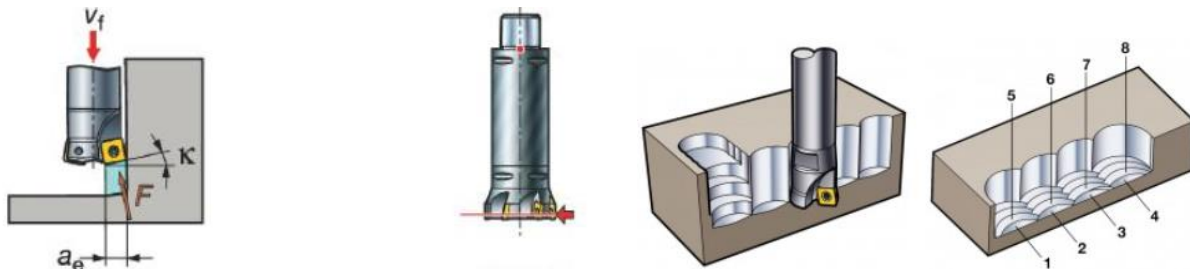


Figura 3.8 Fresado en *plunge* y fresado planar (izq.), Acabado resultante del fresado en *plunge* (dcha.) (Sandvik Coromant, 2019).

3.2.3.- Taladrado

El taladrado es un proceso de manufactura donde la herramienta remueve material para la realización de agujeros, en general, mediante una herramienta de dos filos conocida como broca helicoidal (Schey, 2000). A diferencia del fresado, la herramienta tiene un avance paralelo al eje de giro de la herramienta.

Existen dos tipos de agujero con broca helicoidal, Groover (2010) los clasifica en dos (fig. 3.9): agujero completo y agujero ciego. El agujero completo se caracteriza por la salida de la broca en el lado opuesto de trabajo, mientras que el agujero ciego se realiza a cierta profundidad, sin atravesar la pieza de trabajo.

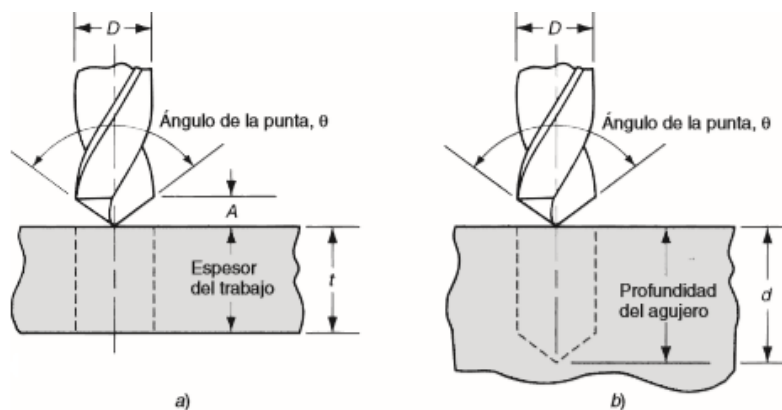


Figura 3.9 Tipos de agujeros: a) completo y b) ciego (Groover, 2010).

Existen distintas operaciones relacionadas con el taladrado. Groover (2010) menciona que las mayorías de las operaciones de taladrado se realizan sobre un agujero previamente taladrado. Entre éstas se encuentran el centrado, que consiste en el taladrado de un agujero inicial para localizar el centro de un agujero; y el roscado interior, operación que usa un machuelo para realizar una rosca al interior del agujero (fig. 3.10).

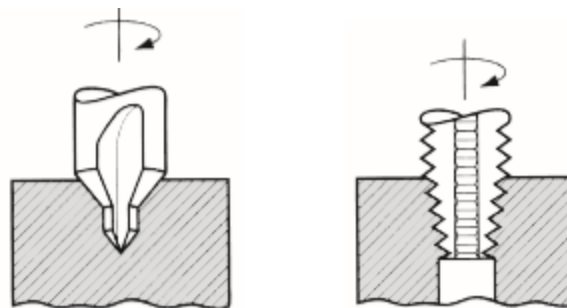


Figura 3.10 De izquierda a derecha: centrado y roscado interior (Groover, 2010).

3.2.4.- Parámetros de maquinado

Si bien la mayoría de los softwares CAM simplifican la tarea de simular los procesos de manufactura, aún requieren de ciertos parámetros de entrada para realizar eficientemente el trabajo. Las siguientes expresiones son válidas para los procesos de maquinado: fresado, taladrado y torneado.

- Velocidad de corte: la velocidad de corte es definida como la máxima velocidad lineal entre la herramienta y la pieza a maquinar. La velocidad de corte utiliza unidades de distancia por minuto (Chang, et al., 2006). En la literatura se ofrecen recomendaciones de velocidad de corte para distintos materiales y cortadores.

La velocidad de corte se determina mediante expresiones en función del diámetro de la herramienta para el fresado y el taladrado; para el torno se usa el diámetro de la pieza a maquinar. Se define mediante las siguientes expresiones:

En unidades del sistema métrico:

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000} \left[\frac{m}{min} \right]$$

En unidades de uso común en los Estados Unidos:

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{12} \left[\frac{ft}{min} \right]$$

Donde (fig. 3.11):

V es la velocidad de corte

D es el diámetro; SI: [mm], en unidades de uso común en EE.UU.: [in]

N es la velocidad del husillo en revoluciones por minuto

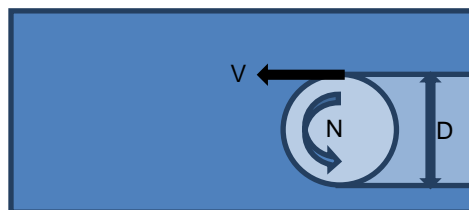


Figura 3.11 Velocidad de corte

- Avance y velocidad de avance: el avance, según Chang (2006), se define como el movimiento lateral relativo entre la herramienta y la pieza a maquinar. Este parámetro corresponde al espesor de la viruta producida durante la operación. En torno y taladrado, el avance se define como el avance del corte por revolución de la pieza a maquinar o de la herramienta, conocido como avance por revolución

(f_n). Puede encontrarse como pulgadas por revolución o milímetros por revolución.

Por otro lado, en el proceso de fresado, el avance se define como el avance por diente (f_z), que representa el avance que realiza cada diente por revolución; de este valor depende el tamaño de la viruta formada por cada diente del cortador. Sus unidades son milímetros o pulgadas por diente.

En cuanto a la velocidad de avance, se encuentra en pulgadas por minuto o en milímetros por minuto. Se define mediante la siguiente expresión:

$$V_f = f \cdot n \cdot N$$

Donde (fig. 3.12):

V_f es la velocidad de avance

f es el avance f_z (mm o in por diente) o f_n (mm o in por revolución)

n es el número de dientes de la herramienta

N son las revoluciones por minuto

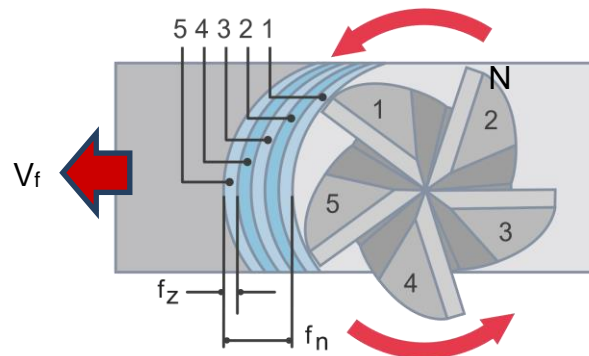


Figura 3.12 Avance y velocidad de avance (FAMA TOOLS, 2008)

- Profundidad de corte (fig. 3.13): es la distancia de penetración de la herramienta en la pieza a maquinar. Este parámetro depende de la rigidez de la herramienta, así como la potencia de la máquina. Al igual que otros parámetros existen distintas recomendaciones según los resultados finales buscados. En el presente trabajo, se usará una profundidad de corte de 25-50% (Autodesk Inc., 2014) del diámetro de la herramienta para las operaciones de fresado.

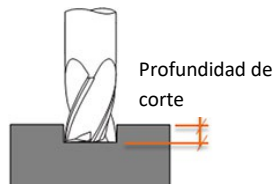


Figura 3.13 Profundidad de corte (Harvey Performance Company, 2017)

3.2.5.- Manufactura en NX 10®

Debido a la necesidad de realizar distintos procesos de manufactura y operaciones para la manufactura de productos, se han desarrollado centros de maquinado que pueden ejecutar múltiples operaciones (siendo las más comunes fresado y taladrado) en una misma sesión, donde la materia prima se configura una sola vez y se pueden montar múltiples herramientas con cambio automático entre ellas (Groover, 2010). Estos centros de maquinado usan control numérico computarizado, que se define como un método de automatización programable, donde múltiples funciones de la máquina herramienta son controladas a través de instrucciones por números, letras y símbolos (Alavala, 2009).

En la generación de instrucciones para centros de maquinado CNC, son usados programas que realizan la interacción de control numérico con software CAD. Esto permite visualizar el producto a realizar, así como mostrar las trayectorias de corte resultantes (Chang, et al., 2006). Las trayectorias de corte describen el movimiento de la herramienta durante las operaciones de maquinado.

En la realización de este trabajo, se usó el software *Siemens NX 10®*, que permite generar simulación y trayectoria de corte para los diversos procesos de manufactura. Se eligió *NX 10®* debido a ser un software que integra herramientas de diseño, simulación y fabricación, cubriendo el desarrollo de productos desde la etapa conceptual, hasta la fabricación (*Siemens Product Lifecycle Management Software Inc*, 2014). Este software realiza simulaciones con los procesos:

- Torneado
- Fresado
- Tornofresado
- Electroerosión de hilo metálico
- Taladrado

Cada operación incluye datos como: geometría de la pieza de trabajo, proceso de manufactura, herramienta a usar, parámetros y estrategias de corte.

El uso de un modelo sólido permite al usuario seleccionar el sistema de coordenadas de la máquina, material de la pieza a maquinar, áreas de maquinado y áreas por omitir y dimensiones de materia prima.

Las herramientas pueden ser definidas antes de las operaciones. En general, se introducen las dimensiones y características físicas de la herramienta (fig. 3.14).

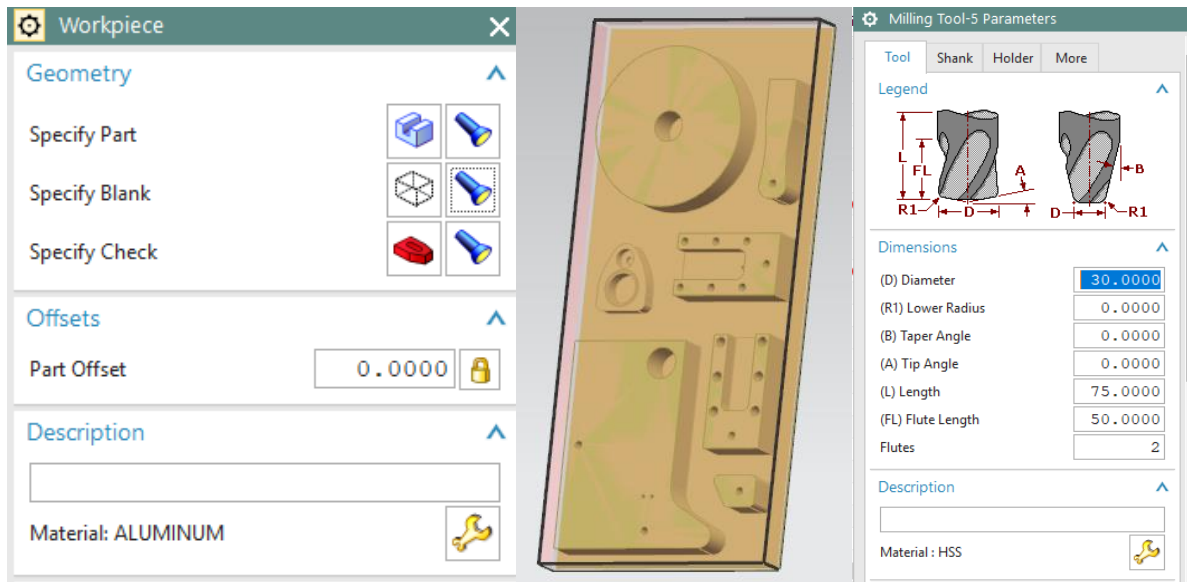


Figura 3.14 Definición de geometría, visualización de materia prima y definición de herramienta. *Siemens NX 10®*.

El software *NX 10®*, ofrece distintas plantillas para realizar operaciones de fresado, con el objetivo de optimizar y simplificar el proceso de simulación y generación de trayectorias. Estas plantillas están basadas en el tipo de herramienta a usar y la geometría de la pieza a manufacturar (fig. 3.15).

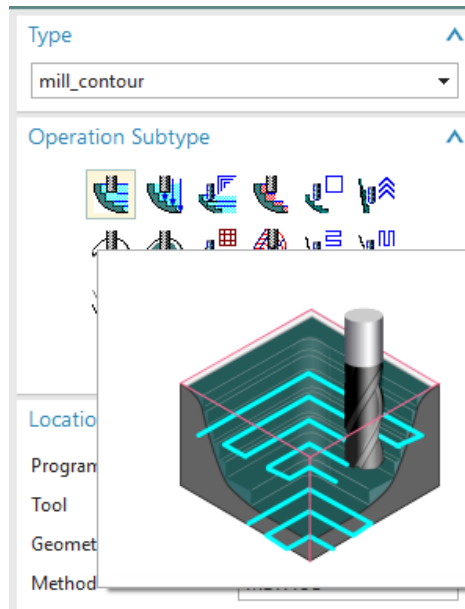


Figura 3.15 Menú de plantillas de operaciones de *NX 10®*.

En cuanto a estrategias de corte, *NX 10®* ofrece las siguientes listadas:

Estrategias con pasadas de líneas paralelas (fig. 3.16):

- *Zig*: estrategia que mantiene una misma dirección de corte. Al terminar el corte, la herramienta se retrae para comenzar la siguiente línea.
- *Zig-Zag*: estrategia que genera una serie de líneas paralelas que alternan la dirección del corte. El corte es continuo.
- *Zig with contour*: al igual que *Zig*, este mantiene una dirección de corte. Se agregan movimientos que siguen el contorno de la pieza al inicio o al término de la línea de corte.

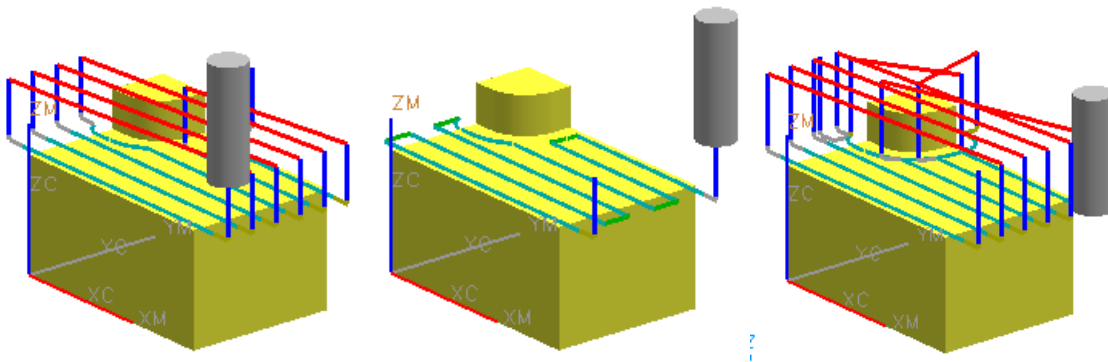


Figura 3.16 Estrategias de corte: Zig, Zig-Zag y Zig with contour (Siemens Product Lifecycle Management Software Inc, 2014).

Estrategias con secuencias de pasos concéntricos (fig. 3.17):

- *Follow periphery*: estrategia de corte que sigue los bordes de la pieza, aumentando la distancia progresivamente hacia su centro.
- *Follow part*: estrategia donde la trayectoria se mantiene concéntrica respecto a cierta geometría en la pieza.
- *Trochoidal*: estrategia que usa trayectorias circulares y lineares para la remoción de material. Se puede presentar con trayectorias que inician alejadas de las paredes de la pieza y avanzan hacia éstas (*outward*), o con cortes circulares en el interior de la pieza, para terminar con cortes que siguen la periferia de la pieza (*inward*).

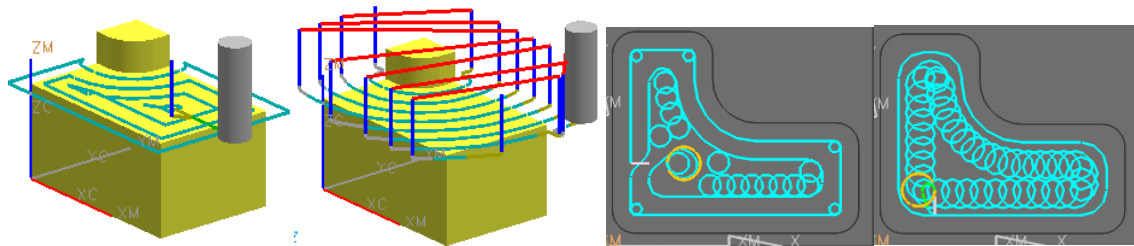


Figura 3.17 Estrategias de corte: *Follow periphery*, *Follow part*, *Trochoidal (outward e inward)* (Siemens Product Lifecycle Management Software Inc, 2014).

La velocidad de corte, el avance, la velocidad del husillo y la velocidad de avance. Se requiere introducir al menos dos valores para que el mismo software realice el cálculo de los valores dependientes (fig. 3.18).

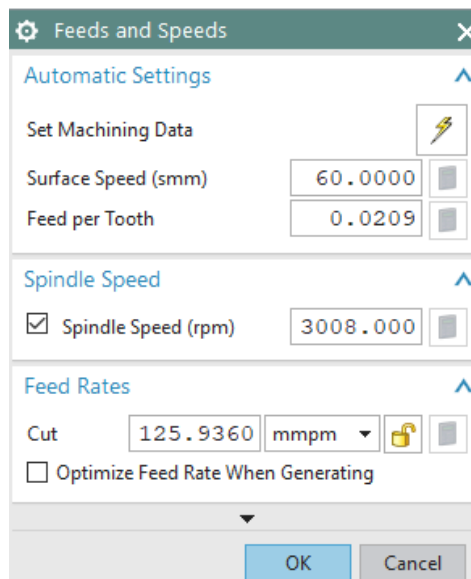


Figura 3.18 Menú de parámetros de corte en NX 10®.

3.3.- Evaluación ambiental del ciclo de vida

El ciclo de vida hace referencia al intercambio de entradas y salidas a lo largo de la creación, desarrollo y muerte de un producto con su entorno. Las entradas y salidas contemplan las etapas iniciales, desde la extracción de materia prima, hasta el último proceso realizado en el final de vida del producto (Ulrich & Eppinger, 2013).

La complejidad del análisis del impacto del ciclo de vida radica, en tratar de tener a todo el conjunto de procesos que componen al producto a lo largo de toda su vida útil, así como el impacto en el medio ambiente. La incertidumbre en la obtención de datos de los procesos desde la extracción de materia prima hasta la disposición es intrínseca (Vezzoli & Manzini, 2015).

Para organizar los procesos realizados durante la vida del producto, así como seguir las transformaciones del producto, la energía usada y la liberación de contaminantes, el ciclo de vida se compone de las siguientes partes (Sustainable Minds, 2019):

- **Preproducción:** se comienza con la extracción y procesamiento de materia prima, además del transporte de los bienes obtenidos a los centros de producción. En esta etapa se visualizan los recursos obtenidos por medio del reciclaje y los recursos vírgenes.
- **Producción:** aquí sucede la transformación de materia prima, los ensamblajes y procesos de acabado. De igual manera, se incluye el transporte de los componentes a las distintas fábricas o instalaciones donde ocurren los procesos y transformaciones.
- **Distribución:** incluye al embalaje, el transporte y el almacenaje del producto terminado. Tiende a mezclarse con la etapa de producción debido a la interacción con el producto.
- **Uso:** el producto puede requerir recursos y energía para su funcionamiento, así como puede generar residuos y/o emisiones. Se contempla el mantenimiento al producto, reparación y cambio de componentes.
- **Disposición:** al término de la vida útil del producto, se considera la reutilización de algunas partes que se encuentren en buen estado, por lo que se incluye la recuperación de las piezas (transporte y procesamiento). Por otro lado, si es desechado, puede ser reciclado, compostado o incinerado.

La evaluación del ciclo de vida (LCA, por sus siglas en inglés), es una metodología de análisis y valoración del impacto ambiental, a lo largo del ciclo de vida de un producto o servicio. Se usa como herramienta de apoyo en el diseño, así como en la planeación de estrategias de desarrollo ambiental.

El análisis se realiza mediante el análisis de las entradas y salidas más importantes del sistema y no incluye análisis económicos ni sociales. Se encuentra estandarizado por la norma ISO 14044 (Vezzoli & Manzini, 2015).

El LCA se realiza para tener un panorama lo más claro posible sobre las interacciones, entre las actividades realizadas y el medio ambiente, así como entender las consecuencias ambientales de éstas y hacer uso de la información, para obtener una mejora en las condiciones ambientales consecuentes de dichas actividades.

Consta de cuatro partes:

- Definición de los objetivos y propósitos: consta de cuatro etapas, donde se definen: razones para la realización del estudio; el producto, su sistema y sus límites; unidad funcional, basada en el rendimiento del sistema; y la calidad de los datos.
- Caracterización (*Life Cycle Inventory*): en esta etapa se identifican las entradas y salidas del sistema, se interpretan los datos y se realiza una tabla de inventario.
- Evaluación del impacto: etapa realizada por softwares de LCA, presenta cuatro fases sucesivas:
 - Clasificación: las entradas y salidas se agrupan con base en sus efectos.
 - Caracterización: se agregan impactos dentro de cada clase de efecto.
 - Normalización: los valores-efectos se hacen proporcionales a un perfil normal establecido por la metodología del software.
 - Evaluación: se ponderan las contribuciones de las distintas categorías, obtenidas en la clasificación, para compararlas.
- Interpretación: los resultados de las etapas de evaluación y caracterización son revisados contra los enfoques y objetivos del estudio, de tal manera que puedan ser usados como conclusión.

Existen distintos softwares para evaluación del ciclo de vida, que usan su propio método en las etapas de definición, evaluación e interpretación. En el presente trabajo, se usará la herramienta *Sustainable Minds*®, de tal manera que la propuesta a desarrollar pueda ser comparada con otros trabajos realizados y evaluados.

3.3.1.- Sustainable Minds®

Sustainable Minds® (fig. 3.19) es un software en línea que se presenta como una herramienta auxiliar en el diseño de productos, que mide el impacto ambiental del ciclo de vida de conceptos a través de emisiones de CO₂ y milipuntos (un punto representa la carga ambiental anual generada por un país, correspondiente a un individuo; debido a las pequeñas cantidades que presentan los conceptos, se maneja el concepto de milipunto) y los compara de tal manera que se pueda lograr una innovación de productos

sustentable. La herramienta se basa en la norma ISO 14044, estándar de evaluación del impacto ambiental (LCA) (Meijer, 2011).



Figura 3.19 Logo de *Sustainable Minds*® (Sustainable Minds, 2019).

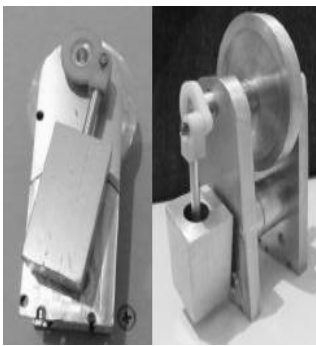
Las etapas de la LCA en *Sustainable Minds*® se dan de la siguiente manera:

- Definición de los objetivos y propósitos: aquí se nombra al concepto a evaluar, se define la unidad funcional, las metas y las barreras del sistema.
- Caracterización (*Life Cycle Inventory*): en esta etapa, el usuario genera la lista de materiales, introduciendo el peso de los componentes. De igual manera, el usuario introduce procesos, transporte en distancia recorrida, energía en kWh y/o combustibles usados durante su funcionamiento en peso, y el final de vida del producto que incluye el método o proceso por el cual el producto será desechado o reciclado.
- Evaluación del impacto: etapa realizada por *Sustainable Minds*®, donde los parámetros usados para la normalización cumplen con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés).
- Interpretación: el software entrega gráficas comparativas de emisiones de CO₂, marcando lo correspondiente a procesos y componentes. Así mismo, califica los conceptos evaluados con milipuntos.

3.3.- Trabajos previos

Desde el semestre 2010-1, el motor de aire se realiza en la asignatura. Se presenta un modelo final y se deja al alumno el desarrollo de un prototipo funcional, de tal manera que el proyecto exija al estudiante el involucrarse tanto en la etapa de diseño, como en la de manufactura. Posteriormente, se realizó un trabajo de investigación (Corella & Ramírez, 2011) que toma el motor de aire como eje principal para el desarrollo de un proyecto integrador en la asignatura de Diseño y manufactura asistidos por computadora.

Del trabajo se obtuvo un diseño optimizado del motor, de tal manera que se aprovechara al máximo el intervalo de entrada y salida de aire.

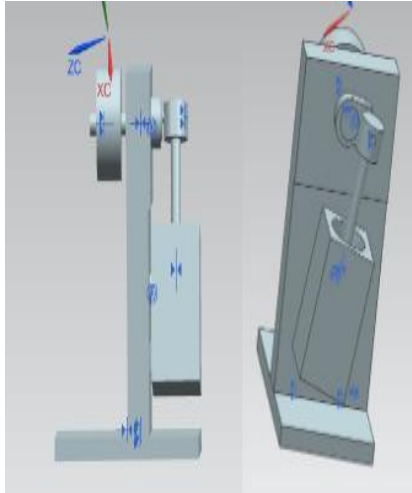
	Descripción del modelo	Número de piezas fabricadas (fabricadas + comerciales)	Máquinas usadas y número de piezas obtenidas	Tiempo de manufactura
	Motor de simple efecto, dos soportes. Presenta dos piezas de manufactura aditiva.	9 (16)	Fresa CNC: 4 Torno CNC: 3 Manufactura aditiva: 2	5h 5min

Cuadro 3.1 Características motor aire (Corella & Ramírez, 2011)

Del trabajo, se generaron distintos escenarios de aplicación basados en los conocimientos previos del grupo, así como material de guía para las distintas etapas del proyecto, los cuales fueron implementados en la asignatura en los años posteriores.

Posteriormente, se propuso el rediseño del motor de aire, donde se introdujera el concepto de sustentabilidad en el desarrollo de nuevos productos. En el trabajo de investigación de (Borja, et al., 2018), se recopila y evalúa los motores desarrollados desde el 2010 hasta el semestre 2016-2, eligiendo 5 motores distintos, que presentaran diferencias marcadas. La sustentabilidad de estos motores fue evaluada con el software *Sustainable Minds®*.

A partir de la evaluación de la sustentabilidad de los motores, se propuso un diseño que explotara las mejores cualidades de los mejor puntuados, resultando el motor mostrado en el cuadro 3.2:

	Descripción del modelo	Número de piezas fabricadas (fabricadas + comerciales)	Máquinas usadas y número de piezas obtenidas	Tiempo manufactura
	Motor simple efecto, un soporte. La manivela está realizada mediante manufactura aditiva	8 (12)	Fresa CNC: 5 Torno CNC: 2 Manufactura aditiva: 1	No se prototipó

Cuadro 3.2 Características motor aire (Borja, et al., 2018)

4.- Diseño conceptual

4.1.- Identificación de necesidades

A través de la interacción con alumnos inscritos en la asignatura de CAD-CAM, aunado a la experiencia de cursar la asignatura, se obtuvo lo siguiente:

- El proyecto motor de aire cumple con las condiciones de la metodología de aprendizaje basado en proyectos: es atractivo para los alumnos, genera la participación del equipo en el proceso y tiene una dificultad adecuada.
- En cuanto a la percepción de los alumnos, en la etapa de manufactura tienden a involucrarse menos en comparación con la etapa de diseño, mostrando interés en tener una participación más activa, manteniendo un costo no restrictivo para la realización del ejercicio de aprendizaje.
- En los trabajos anteriores se usan distintas máquinas herramientas para la manufactura del motor. Por ejemplo, en el trabajo de Corella & Ramírez (2011), se tiene los siguientes datos de uso de máquinas, tiempo de manufactura y número de piezas realizadas en cada máquina herramienta mostrados en el cuadro 4.1:

Máquina usada	Tiempo de manufactura	Número de piezas obtenidas
Fresa EMCO VMC-300	3 horas 30 minutos	4
Torno EMCO VMC-242	1 hora 15 minutos	3
Manufactura aditiva (ABS)	20 minutos	2
Total	5 horas 5 minutos	9

Cuadro 4.1 Detalles de manufactura de piezas (Corella & Ramírez, 2011)

- En el semestre 2018-1 se formaron 8 equipos en el grupo 5 de CAD-CAM, si a cada uno de los equipos les tomará en promedio 5 horas para la realización del motor de aire, equivaldría a 40 horas de uso del laboratorio. Aunado a la cantidad de grupos abiertos, más las distintas asignaturas que hacen uso de las máquinas de control numérico y proyectos desarrollados, se presenta una oportunidad de mejora en el tiempo de manufactura del motor.

En el presente trabajo se propone la realización del motor sobre una sola pieza de trabajo, en la misma sesión sin necesidad de remover la pieza. De tal manera que sólo se tenga que configurar una sola vez a la máquina CNC.

En el cuadro 4.2 se presentan los requerimientos obtenidos a partir de la interacción con un grupo de CAD-CAM, las reglas del LMA y los objetivos del presente, usando una escala del 1 al 5, donde el 1 indica la menor importancia y 5 representa la mayor importancia para los objetivos del trabajo.

#	Requerimiento	Importancia
1	El motor usa aire comprimido	4
2	El motor usa un proceso de manufactura de corta duración	4
3	El motor es de bajo costo	3
4	El motor es atractivo para los alumnos	5
5	El motor usa procesos de manufactura que permite el manejo de la máquina herramienta al alumno	3
6	El motor contiene una pieza realizada en CNC	5
7	El motor usa procesos de manufactura realizables por la fresa VMC 300	5
8	El motor es manufacturado a partir de una misma pieza de trabajo	5
9	El motor es ensamblado con herramientas comerciales	3
10	El motor es de fácil ensamble	4

Cuadro 4.2 Requerimientos del proyecto

4.2.- Especificaciones

Partiendo de los requerimientos obtenidos en la sección anterior, el uso de la fresadora VMC 300 implica ciertas cuestiones a considerar:

EMCO VMC 300 (fig. 4.1):

Fresa de control numérico de 4 ejes, con capacidad de sujetar hasta 12 herramientas.

Velocidad máxima del husillo: 5000 RPM

Memoria disponible: 51,935 caracteres



Figura 4.1 EMCO VMC 300

Sobre la VMC 300, se encuentra montada la prensa mostrada en la figura 4.2, con las siguientes dimensiones: 104 mm de máxima apertura de mordaza y 47 mm de profundidad.

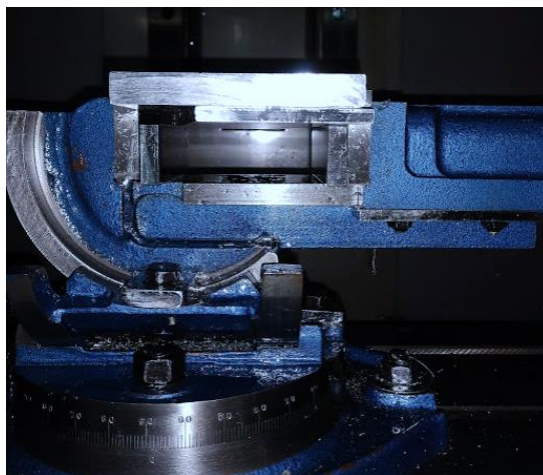


Figura 4.2 Prensa de la máquina VMC 300

En el cuadro 4.3, se muestra el cuadro de especificaciones establecidas para la nueva propuesta a desarrollar, las necesidades de donde se derivan, unidades y valores

definidos basados en la maquinaria usada, reglas de laboratorio e interacciones con estudiantes.

#	Métrica	Necesidad relacionada	Unidades	Rangos	Importancia
1	Tiempo de maquinado	2,5,7,8	minutos	120-230	5
2	Componentes fabricadas en la misma pieza de trabajo	6,8	número	>5	5
3	Costo de materia prima y herramientas	3,5	MXN	<900	3
4	Pieza de trabajo montable en prensa	6	binario	pasa	4
5	Tamaño del archivo de programa CNC	6	caracteres	<51935	4
6	Herramientas usadas para ensamble	9	número	<6	3

Cuadro 4.3 Cuadro de especificaciones

4.4.- Propuestas de diseño anteriores

Si bien las especificaciones toman en cuenta al objetivo del proyecto y a los usuarios finales, los diseños anteriores obtuvieron resultados relevantes para el desarrollo del motor. A continuación, se hace énfasis en los resultados obtenidos que son utilizados para la realización de la propuesta de diseño.

La tesis "Desarrollo de dos proyectos didácticos para la asignatura de Diseño y Manufactura Asistidos por computadora" (Corella & Ramírez, 2011), realizó el diseño de un motor de efecto simple (fig.4.3). El motor se caracteriza por manufacturar la manivela mediante manufactura aditiva y usar dos soportes. El prototipo es funcional.

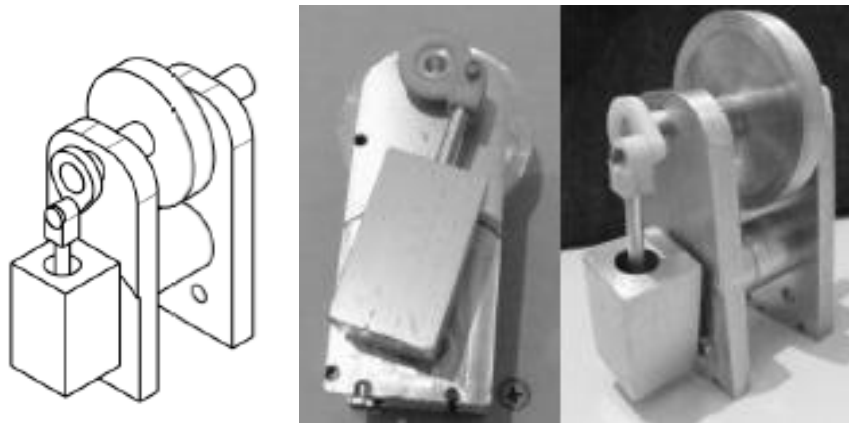


Figura 4.3 Prototipo desarrollado (Corella & Ramírez, 2011)

De la tesis se concluye que el desarrollo del motor de simple efecto genera interés hacia la asignatura, además de las ventajas en el aprendizaje: familiarizarse con procesos de manufactura, fomentar el trabajo en equipo e integrar los conocimientos de CAD-CAM con lo aprendido en asignaturas previas. Además, Corella & Ramírez (2011) generaron medidas propuestas (cuadro 4.4 y figura 4.5) para el desarrollo de motores de simple efecto con distintas dimensiones como ejercicio didáctico. Estas dimensiones se realizaron con el fin de optimizar el ciclo del motor y su manufactura.

a	b	Longitud del bloque	Longitud pistón	Radio	Ángulo	Profundidad barreno pistón
36	9	41	42	21	14.48	35
38	9	43	45	22	13.70	37
38	10	39	42	20	15.26	33
39	8	49	50	25	11.84	43
40	8	51	52	26	11.54	45
40	9	45	48	23	13.00	39
40	10	41	45	21	14.48	35
41	8	51	53	26	11.25	45
41	9	47	50	24	12.68	41

Cuadro 4.4 Medidas propuestas (Corella & Ramírez, 2011)

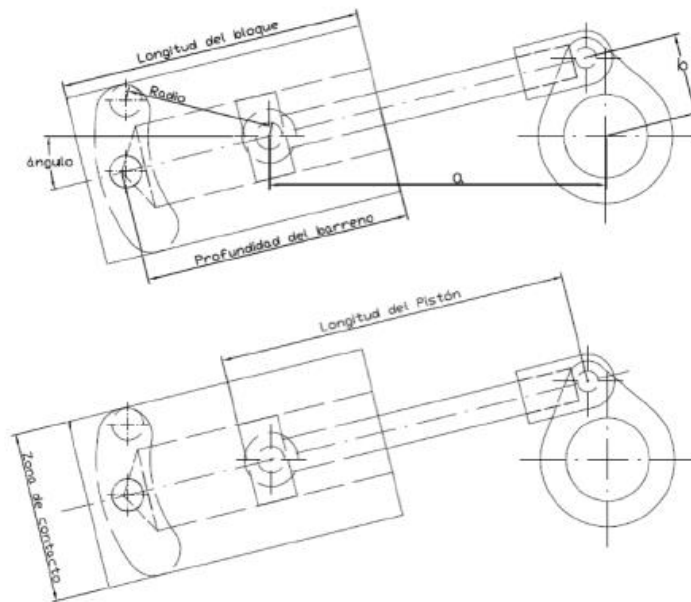


Figura 4.4 Configuración del motor (Corella & Ramírez, 2011).

Otra propuesta de motor es presentada en el artículo "Estudio comparativo de motores de aire didácticos con énfasis en la sustentabilidad" (Borja, et al., 2018). En el artículo se realizó el análisis de los distintos motores realizados desde el 2010 hasta el semestre 2016-2 en el curso de CAD-CAM. Se evaluaron cuatro criterios:

- Eficiencia: mide el desempeño del motor, basado en su funcionamiento
- Manufacturabilidad: engloba la complejidad de las piezas, la cantidad de herramientas usadas y la facilidad de conseguirlas.
- Milipuntos: medida proporcionada por *sustainable minds*. (Un punto representa la carga anual en el ambiente del país, en este caso Estados Unidos, correspondiente a cada habitante del país) (*Sustainable Minds*, 2019).
- Costo: engloba el costo de materia prima y el de maquinado.

Usando estos parámetros, Borja, et al. (2018) evaluaron 5 categorías de motores, donde las características de los motores con mejor puntuación en los 4 rubros se utilizarán para el diseño de una propuesta, englobando lo mejor de todos los analizados.

Se obtuvo como resultado el motor "X" (fig. 4.5), que cuenta con las siguientes características:

- Motor de simple efecto con un solo soporte.
- Consta de 7 piezas manufacturadas más elementos comerciales.

- Combina elementos en aluminio y ABS: La manivela se obtiene mediante manufactura aditiva.
- La evaluación en *sustainable minds*® arroja un resultado de 1.1 milipuntos.

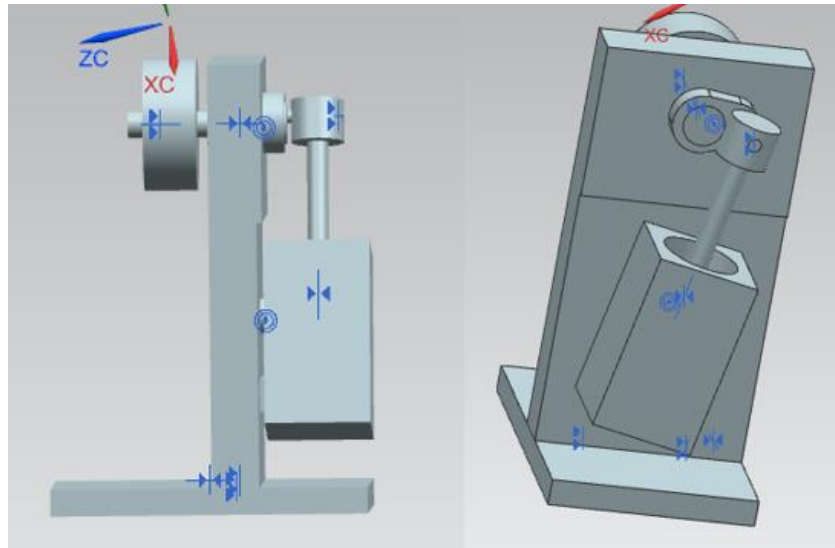


Figura 4.5 Motor X (Borja, et al., 2018).

4.5.- Propuestas de solución

Teniendo en cuenta los requerimientos y especificaciones, así como las expectativas de los alumnos y trabajos anteriores, se procedió a la generación de propuestas para el motor de aire. Todos los motores presentan una configuración donde se usa un sólo soporte vertical y las piezas requieren la menor cantidad de operaciones de manufactura. Basado en el estudio realizado por Borja, et al. (2018), donde el motor desarrollado en el artículo “tiene piezas sencillas que requieran pocos procesos simples reduciendo su impacto respecto a la sustentabilidad”.

La generación de la propuesta #1 (figura 4.6) está basada en la realización de una turbina, propuesta presentada por 8 equipos en el curso de CAD-CAM entre 2010 y 2016-2 (Borja, et al., 2016). Ésta se enfoca en los requerimientos 1, 2, 4 y 9, donde se refiere a uso de aire comprimido como fluido de trabajo, procesos de corta duración, proyecto atractivo para los alumnos y uso de herramientas comerciales para su ensamble.

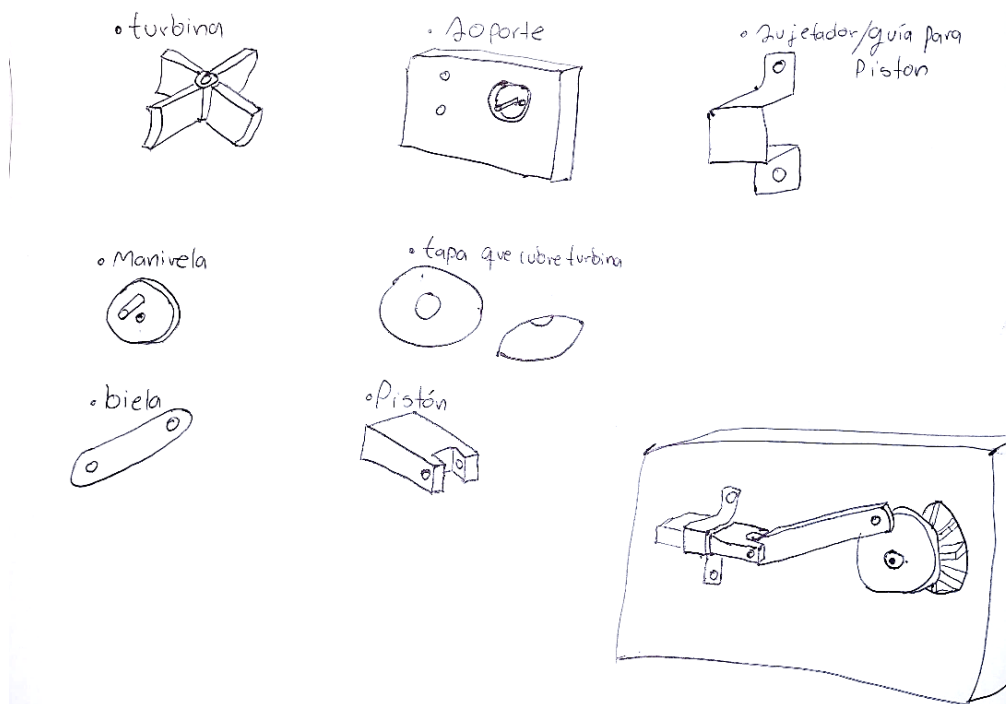


Figura 4.6 Propuesta #1: se basa en invertir el mecanismo de manera que una turbina colocada en una cámara, conformada por el soporte y una tapa de plástico que sella la cavidad, reciba el flujo de aire. La turbina se acoplará a una manivela, que al girar generará el movimiento recíprocante en la corredera/pistón. La turbina y la tapa que sella la cavidad se realizarán mediante manufactura aditiva. La biela, el pistón y la manivela se unirán mediante pernos. El ensamble de la cavidad, y la turbina a su eje de giro se realizará mediante ajuste de interferencia.

Respecto a la propuesta #2 (figura 4.7), se enfoca en la facilidad de ensamble y corta duración en el proceso de manufactura, referenciado al requerimiento 10 y a las especificaciones 1 y 6, reduciendo el uso de tornillos a uno solo, y realizando los ensambles restantes mediante uso de ajustes. Si bien se considera la reducción del tiempo de manufactura sacrificando la realización del mayor número de piezas sobre una misma pieza de trabajo, se incrementa el costo del concepto debido a la adquisición de cortadores especiales.

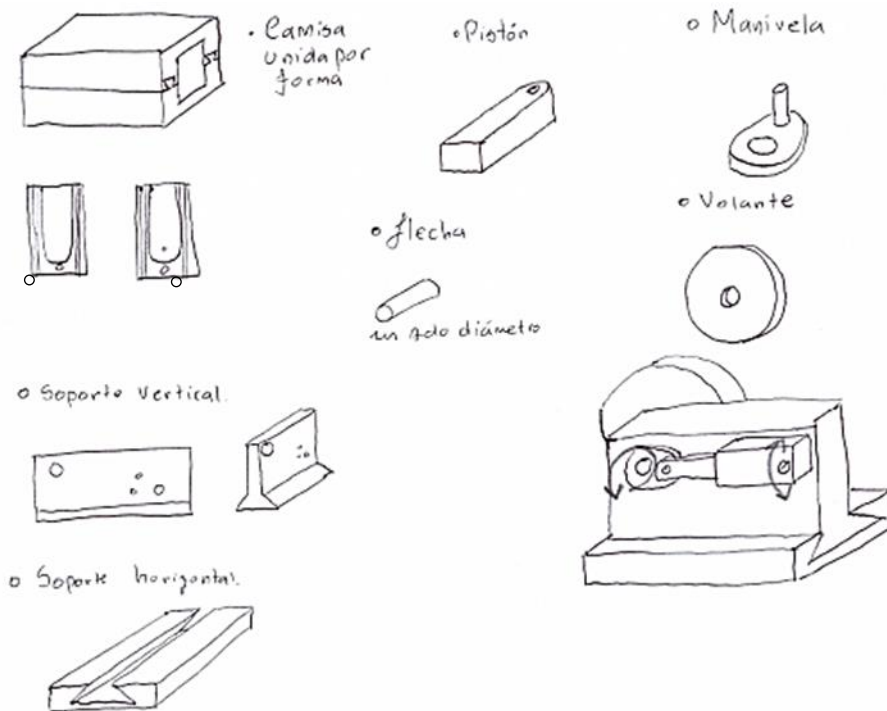


Figura 4.7 Propuesta #2: consta de 8 piezas sin contar elementos de unión, de los cuales solo la camisa con la base horizontal se une mediante un tornillo. La propuesta requiere la compra de un cortador de cola de milano. El eje será comercial, la base horizontal requiere un proceso extra de fresado. Se usa del tornillo es como eje de giro de la camisa.

La propuesta #3 (figura 4.8) se enfoca en el requerimiento 8: el motor es manufacturado a partir de una misma pieza de trabajo. Al igual que se enfoca en realizar más de cinco piezas en una misma pieza de trabajo, correspondiente a la especificación #2. Sin embargo, la propuesta sacrifica la facilidad del ensamble en comparación con la propuesta #2, usando 9 tornillos.

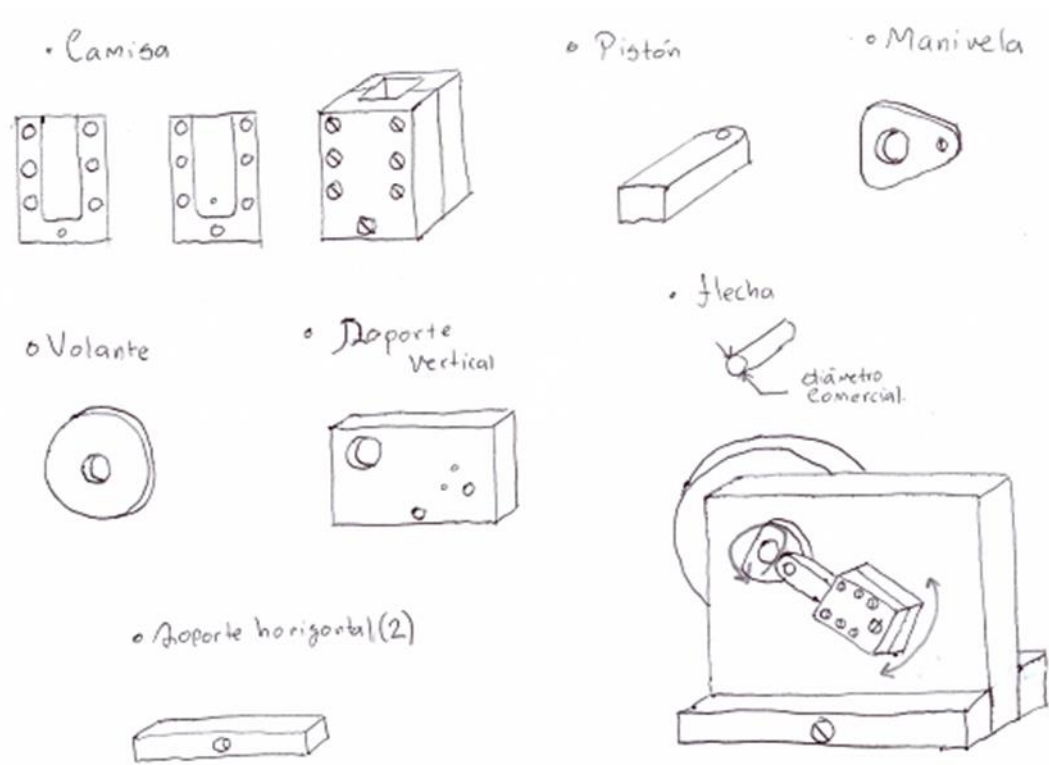


Figura 4.8 Propuesta #3: motor de 8 elementos, donde la camisa, la manivela con el pistón, la camisa con la base horizontal y la base horizontal con la vertical se unen por medio de tornillos. Excluyendo al eje, las demás piezas se planean realizar en la fresadora CNC. El interior de la camisa se mantiene de forma prismática.

Finalmente, la propuesta #4 (figura 4.9), busca destacar en el atractivo del proyecto (requerimiento #4), reflejado en el uso de un mecanismo piñón-cremallera, al igual que se refleja en la facilidad de ensamble (requerimiento #10). Sin embargo, la propuesta requiere la manufactura de piezas con geometrías complejas que requieren herramientas especiales y mayor cantidad de movimientos en el maquinado, resultando en el aumento de tiempo de manufactura (especificación #1), repercutiendo de igual manera en la compra de distintos cortadores aumentando el coste de éste (requerimiento #3).

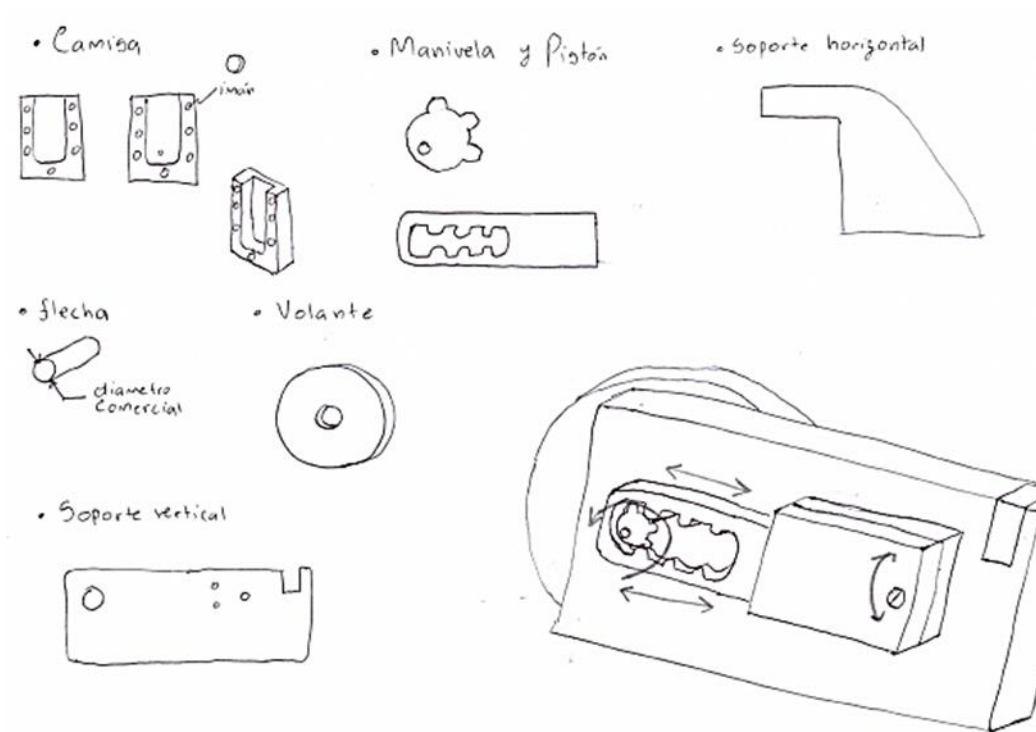


Figura 4.9 Propuesta #4: se usa como transmisión de movimiento un mecanismo de piñón-cremallera para sustituir al mecanismo biela-manivela. La unión de la camisa se realiza mediante imanes que entraran mediante un ajuste de interferencia. Los soportes se unen mediante forma. La camisa se mantiene unida al soporte vertical mediante un tornillo y el resorte.

Las propuestas generadas se evaluaron mediante criterios de selección basados en las especificaciones del proyecto (Cuadro 4.4). Las especificaciones se resumen en cinco criterios. El criterio de costo engloba la materia prima y la compra de herramientas de corte; fácil manufactura engloba al tiempo de manufactura, al uso de herramienta especializada y a la geometría de los componentes a manufacturar; fácil ensamble se refiere al uso de herramientas manuales, uniones por medio de pegamento o tornillos y el criterio atractivo está basado en la subjetividad del autor, donde los elementos visibles y con interacción son mejor puntuados.

Basado en lo anterior, se aplican pesos a los criterios de selección, donde la facilidad de manufactura y el número de componentes realizados por la VMC-300 reciben el mayor peso, siendo el objetivo del presente trabajo. De igual manera, las propuestas son evaluadas en una escala del 1 al 5, donde 5 es lo mejor puntuado en el criterio y 1 lo peor. Así mismo, se realiza una conversión para obtener el peso proporcional a la calificación de la propuesta en cada criterio de selección.

		Concepto 1		Concepto 2		Concepto 3		Concepto 4	
Criterio de selección	Peso [%]	Calif.	%	Calif.	%	Calif.	%	Calif.	%
Bajo Costo	20	5	20	2	8	4	16	3	12
Fácil manufactura	25	4	20	4	20	5	25	2	10
Componentes fabricados por la VMC-300, usando la misma pieza de trabajo	25	2	10	4	20	5	25	5	25
Fácil ensamble	20	3	12	5	20	4	16	5	20
Atractivo	10	2	4	3	6	3	6	5	10
Total	100		66		74		88		77

Cuadro 4.5 Comparativa propuestas vs. criterios de selección

Podemos observar una similitud en las propuestas 2 y 4, si bien se requiere el uso de distintas herramientas para su manufactura, ambos presentan ventajas en el ensamble. El concepto 3 resulta el mejor puntuado en los apartados de manufactura debido a su geometría.

Del cuadro observamos que el ganador resulta ser la propuesta número 3 (fig. 4.10), el cual se desarrolló en la siguiente sección.

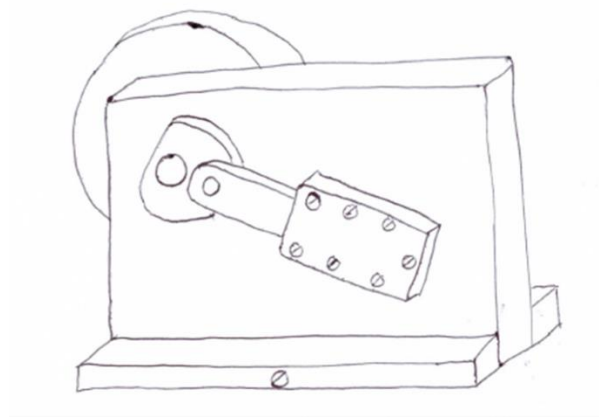


Figura 4.10 Concepto elegido para desarrollar

5.- Ingeniería de detalle

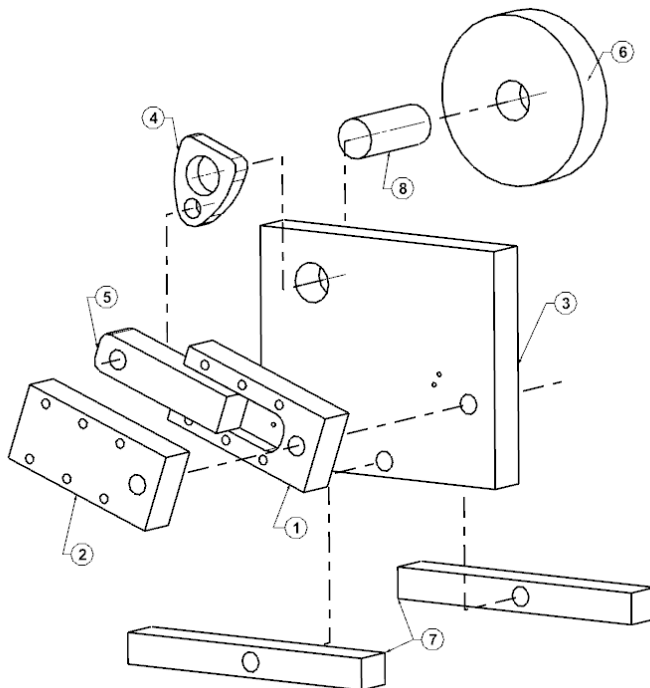
En el presente capítulo, se ahonda en la etapa de diseño y manufactura del motor de vapor.

5.1.- El motor

5.1.1.- Componentes

El motor desarrollado consta de las siguientes partes:

- Soporte vertical.
- Camisa (2).
- Manivela.
- Pistón.
- Volante de inercia.
- Soporte horizontal (2).
- Flecha.



8	FLECHA	1
7	SOPORTE HORIZONTAL	2
6	VOLANTE	1
5	PISTÓN	1
4	MANIVELA	1
3	SOPORTE VERTICAL	1
2	CAMISA 1	1
1	CAMISA 2	1
PC NO	NOMBRE DE PARTE	QTY

Figura 5.1 Motor vista explosionada

Entre los componentes anteriores, se encuentran interacciones críticas para el funcionamiento del motor, las cuáles se diseñaron a detalle:

- Camisa – pistón (fig. 5.2): la interacción entre el pistón y la camisa logra el sellado de la cavidad mediante ajuste de juego entre piezas, necesaria para la realización de trabajo y funcionamiento del motor.

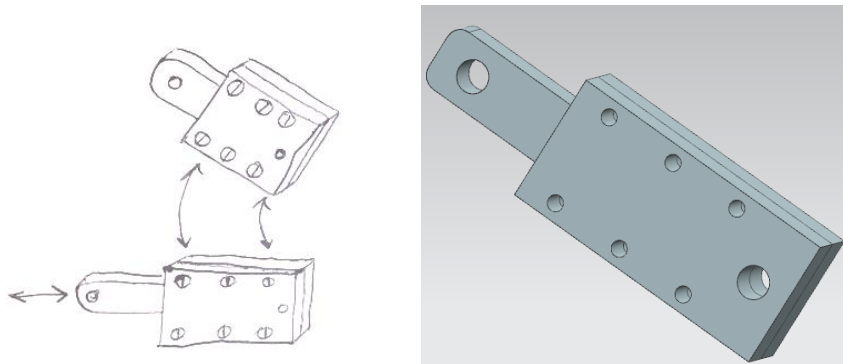


Figura 5.2 Ensamble camisa – pistón.

- Soporte vertical – camisa (fig. 5.3): las válvulas de admisión/expulsión requieren de ciertas especificaciones basadas en las dimensiones de la manivela, la distancia entre eje de giro de la manivela y la camisa, para ser ubicadas correctamente dependiendo de la oscilación. La fricción entre el pistón y la camisa aunado a los efectos de la junta prismática.

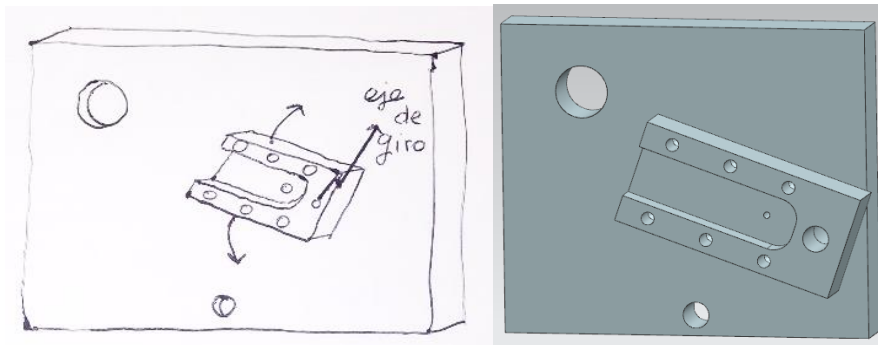


Figura 5.3 Interacción soporte vertical – camisa.

- Camisa (fig. 5.4): el uso de tornillos obliga a prestar atención a los barrenos a realizar, ya sea para la cuerda como para el ajuste del tornillo donde sólo atraviesa. El acabado superficial de superficies en contacto como el pistón, el interior de la camisa y la parte posterior con el soporte vertical.

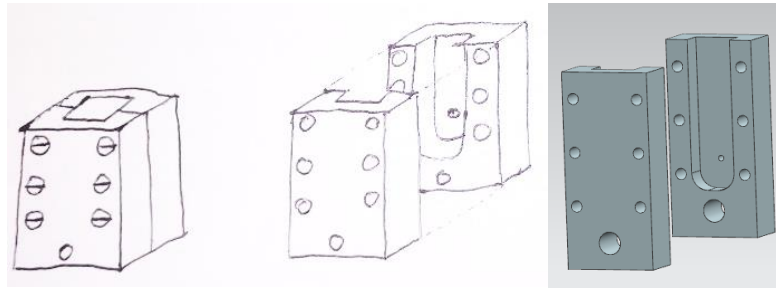


Figura 5.4 Ensamble camisa.

- Manivela - flecha - volante de inercia (fig. 5.5): el ajuste de interferencia mantiene unidos a estos componentes.

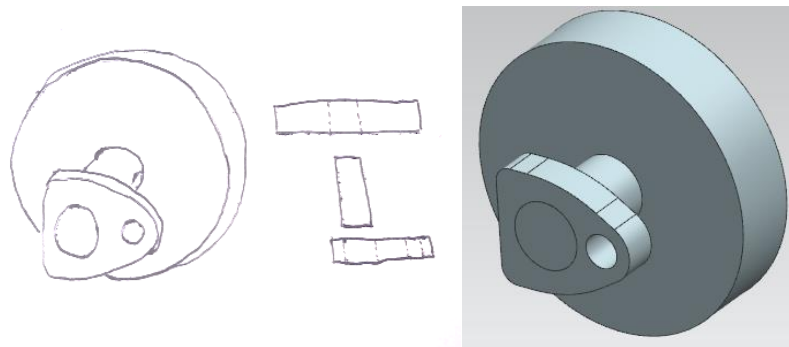


Figura 5.5 Ensamble manivela – flecha – volante de inercia.

- Flecha – soporte vertical (fig. 5.6): entre la flecha y el soporte vertical debe existir un ajuste de juego, permitiendo la rotación libre del componente.

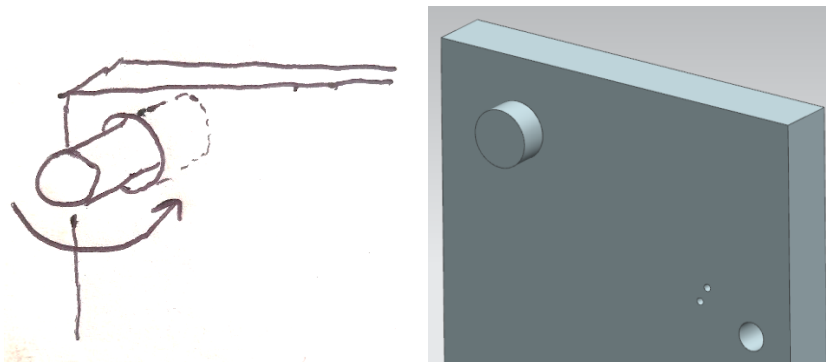


Figura 5.6 Interacción flecha – soporte vertical.

5.2.- Diseño del motor

Como punto de partida, se considera el uso de la prensa montada en la VMC 300, por lo que el motor se realizó usando los siguientes materiales:

- Solera de aluminio de $\frac{1}{2}$ " x 6" x 6"
- Barra redonda de aluminio de $\frac{1}{2}$ " x 1 $\frac{1}{2}$ ".

La elección del aluminio como material de la pieza a maquinar se debe a su maquinabilidad. Si bien Chang (2006) menciona que la viruta de aluminio puro tiende a adherirse a la herramienta, siendo difícil lograr buenos acabados en el maquinado. Sin embargo las aleaciones de aluminio mejoran su maquinabilidad debido a la reducción de la ductilidad, teniendo mejor control en la viruta. La maquinabilidad es un término usado para referirse a la facilidad con la que se remueve material, tomando en cuenta acabado superficial, la vida de la herramienta y la velocidad de remoción de material (Zeid, 1991).

De igual manera, Zeid (1991) hace referencia las aleaciones de aluminio y de magnesio como los materiales con mejor maquinabilidad, seguido del latón y el bronce.

Tomando en cuenta los trabajos anteriores y la evaluación de conceptos, se decidió realizar un motor de efecto simple. Del concepto elegido, se toman medidas basadas en el anexo del trabajo de Corella y Ramírez (2011). A diferencia del trabajo de Corella, la configuración de la camisa cambia adecuándose a la especificación 2: Realizar más de cinco piezas sobre la misma pieza de trabajo. Los cambios más notorios en el diseño se encuentran en la camisa y el pistón.

5.2.1.- Soporte vertical

Para el soporte vertical se usaron las expresiones obtenidas por Corella y Ramírez (2011), donde el autor define las dimensiones de la manivela; la distancia entre el centro de giro de la camisa y el de la manivela, así como la longitud entre el barreno de admisión/expulsión de la camisa y el centro de giro de ésta (fig. 5.7).

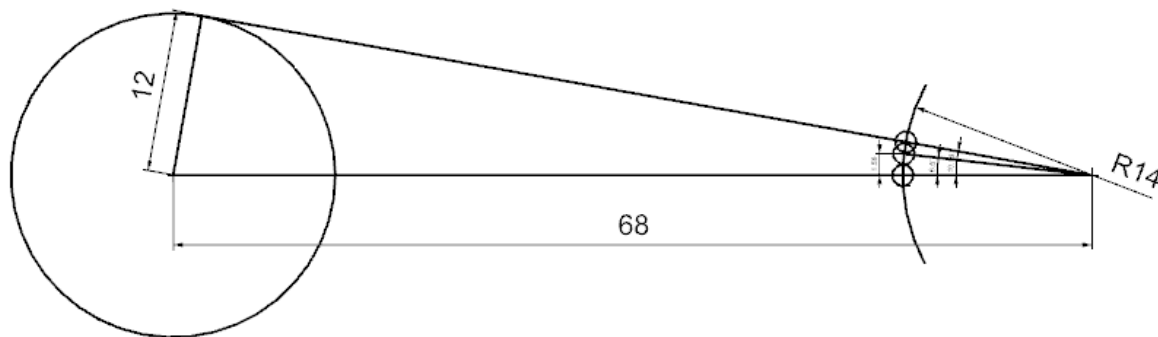


Figura 5.7 Dimensiones de mecanismo manivela-biela.

Posteriormente, se procedió a calcular el intervalo solución del ángulo oscilador de la camisa. Para calcular el ángulo de oscilación máximo se usó la expresión obtenida por Corella y Ramírez (2011):

$$\theta_{3_{Max}} = \text{ArcSen}\left(\frac{b}{a}\right)$$

Donde:

$\theta_{3_{Max}}$ es el ángulo de oscilación máximo de la camisa.

b es la distancia entre el eje de giro de la manivela y el barreno conector.

a es la distancia entre el eje de giro de la manivela y el eje de giro de la camisa.

Sustituyendo los valores $a=48$, $b=12$ se obtiene lo siguiente:

$$\theta_{3_{Max}} = \text{ArcSen}\left(\frac{12}{48}\right) = 10.16^\circ$$

Sin embargo, el ángulo de oscilación está limitado por el diámetro de los barrenos de admisión/expulsión, pues para efectuar trabajo debe de mantener el cierre de la camisa (fig. 5.8). Esto se logra cuando la longitud entre barrenos es igual al diámetro del barreno de admisión/expulsión.

Se tiene la siguiente expresión (Corella & Ramírez, 2011):

$$\alpha = \text{alfa} = \text{ArcCos}\left(1 - \frac{1}{2}\left(\frac{f}{Ra}\right)^2\right)$$

Donde:

α es el ángulo de oscilación mínimo

f es el diámetro del barreno de admisión/expulsión

Ra es la longitud entre el centro de giro de la camisa y el barreno de admisión/expulsión

Sustituyendo valores, se tiene:

$$\alpha = \text{ArcCos}\left(1 - \frac{1}{2}\left(\frac{1.5875}{14}\right)^2\right) = 6.5^\circ$$

fresado, donde el proceso nos permite un rango de IT (calidad de tolerancias) de 6 a 10 (Chevalier, 2005).

Para un ajuste donde la flecha gire libremente con poco juego o no visible, se recomienda el uso del ajuste G7/h6 (Coban Engineering, 2019) (fig. 5.10).

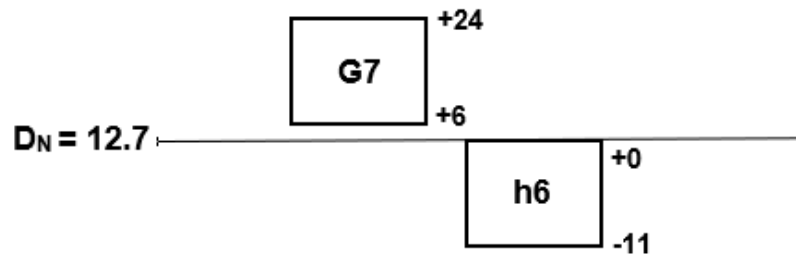


Figura 5.10 Ajuste entre flecha y soporte vertical (Coban Engineering, 2019).

Donde se tienen las características del ajuste en el cuadro 5.1.

Elemento	D _{NOMINAL}	Tolerancia (Posición, calidad)	Diámetro máximo	Diámetro mínimo	Juego máximo (D _{MAX} - d _{MIN})	Juego mínimo (D _{MIN} - d _{MAX})
Flecha	12.7*	h6	12.7 (d _{MAX})	12.689 (d _{MIN})	0.035	0.006
Barreno Soporte	12.7*	G7	12.724 (D _{MAX})	12.706 (D _{MIN})		

Cuadro 5.1 Características del ajuste. Los datos se encuentran en milímetros.
 *El diámetro nominal depende de la medida de la barra. Se recomienda medir el diámetro real de la barra para determinar el diámetro nominal.

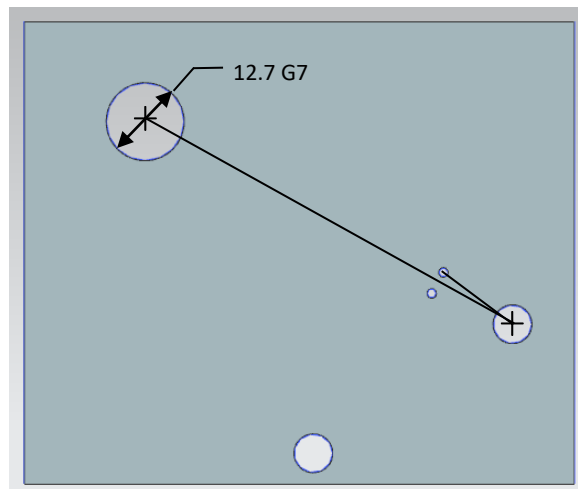


Figura 5.11 Soporte vertical

5.2.2.- Camisa

La camisa pasa a ser un componente de dos piezas como se muestra en la figura 5.12:

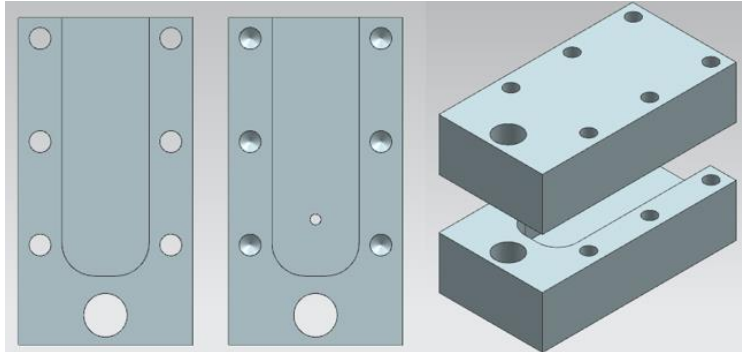


Figura 5.12 Elementos que conforman a la camisa. La división propicia la manufactura sobre un mismo lado.

La partición en la camisa permite realizar la cavidad para el pistón y el agujero de entrada y salida de aire. Sin embargo, se cambia la ubicación del eje de giro de la camisa hacia el extremo más alejado de la manivela, evitando así la reconfiguración de la pieza de trabajo.

Aquí se tiene la interacción entre el pistón y la camisa, de tal manera que se realiza un análisis de tolerancias para un ajuste de juego. En la figura 5.13 se indican las dos dimensiones consideradas para el ajuste del pistón. La dimensión A es definida por el autor, mientras que la dimensión B depende del grosor de la solera donde se fabricará el pistón.

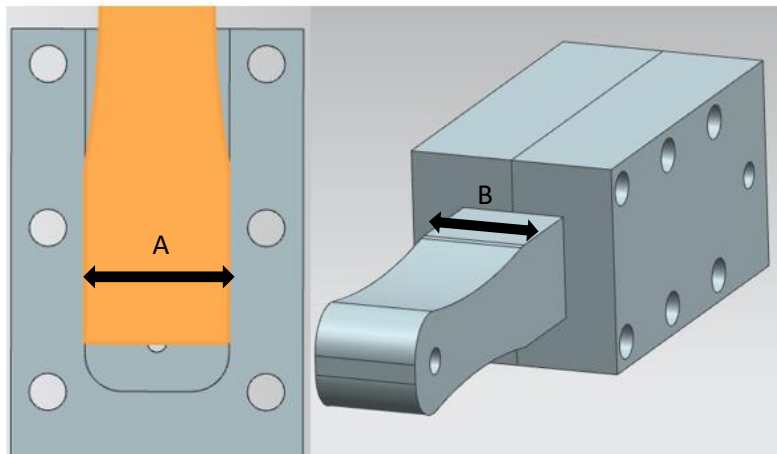


Figura 5.13 Dimensiones en contacto con pistón.

Se considera el uso del fresado para su fabricación; un ajuste de agujero único H7/g6 para la dirección A y un ajuste de eje único G7/h6 para la dirección B (Coban Engineering, 2019).

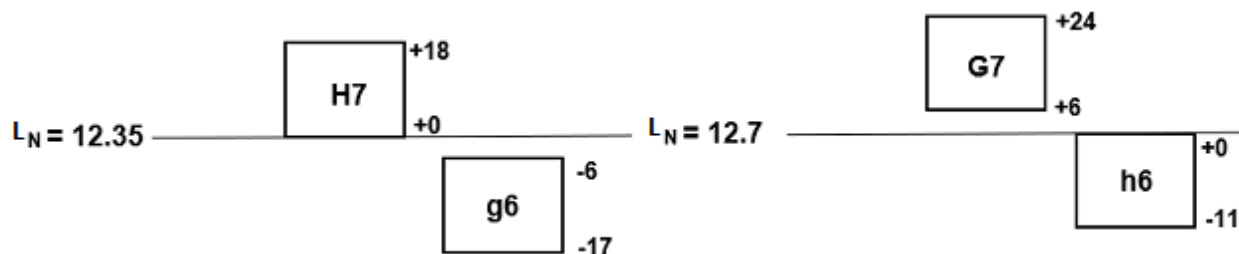


Figura 5.14 Ajuste entre pistón y camisa, dirección A y B (Coban Engineering, 2019).

En el cuadro 5.2 se especifican las características de los ajustes en las direcciones A y B entre la camisa y el pistón:

Identificador		$L_{NOMINAL}$	Tolerancia (Posición, calidad)	Longitud máxima	Longitud mínima	Juego máximo ($L_{MAX} - l_{MIN}$)	Juego mínimo ($L_{MIN} - l_{MAX}$)
Dirección A	Pistón	12.35	g6	12.344 (l_{MAX})	12.333 (l_{MIN})	0.035	0.006
	Camisa	12.35	H7	12.368 (L_{MAX})	12.35 (L_{MIN})		
Dirección B	Pistón	12.7*	h6	12.7 (l_{MAX})	12.689 (l_{MIN})	0.035	0.006
	Camisa	12.7*	G7	12.724 (L_{MAX})	12.706 (L_{MIN})		

Cuadro 5.2 Características ajuste entre camisa y pistón.

*Dimensión dependiente del espesor de la solera. Se recomienda medir el espesor real.

Respecto a la unión mediante tornillos, se opta por usar tornillos de 5/32-32 NS. Se requieren barrenos de 1/8" para la fabricación de la cuerda. Una sola parte de la camisa será roscada, así que para lograr que el tornillo se ensamble con ajuste de holgura se toma en cuenta el diámetro mayor máximo y se busca tamaños de broca que permitan cierta holgura sin juego aparente en el tornillo. Si el diámetro mayor máximo del tornillo 5/32-32 es 4.07 mm (Oberger, et al., 2012), se elige la broca #20 de diámetro nominal de 4.08 mm (fig. 5.15).

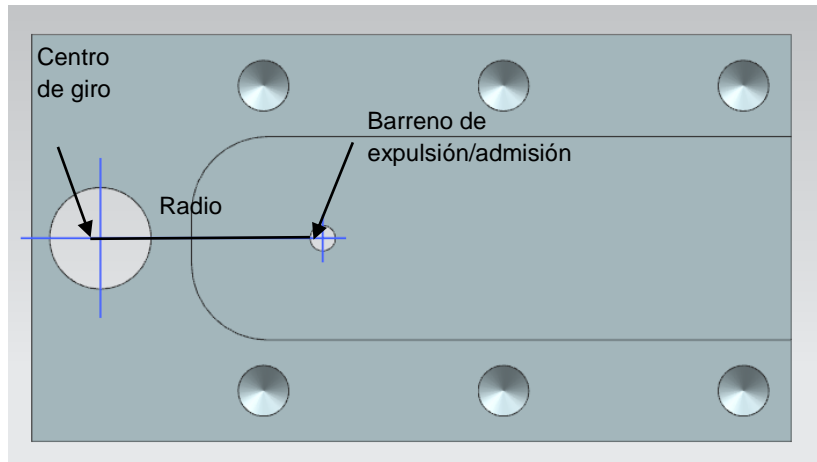


Figura 5.15 Ubicación de centro de giro y barreno de admisión en propuesta de camisa.

5.2.3.-Pistón

El pistón se realiza de un perfil rectangular, para calzar con la forma de la propuesta de camisa. Tiene un barreno de $\frac{1}{4}$ de pulgada. En el apartado correspondiente a la camisa se determina la interacción entre ésta y el pistón (fig. 5.16).

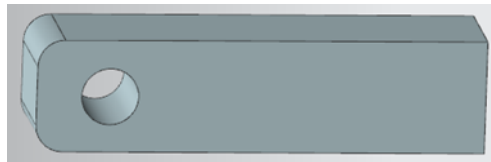


Figura 5.16 Pistón

5.2.4.- Manivela

La manivela (fig. 5.18) toma la longitud entre ejes previamente elegida en el apartado del diseño del soporte vertical. Se toma un ajuste de interferencia P7/h6 para la interacción entre la flecha y la manivela (Chevalier, 2005) (fig. 5.17).

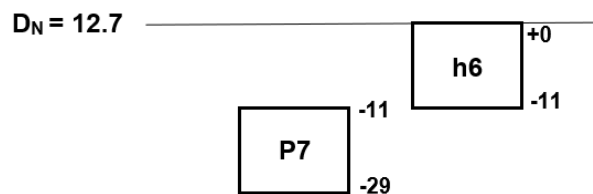


Figura 5.17 Ajuste entre manivela y flecha (Coban Engineering, 2019).

En el cuadro 5.3 se detalla el ajuste entre la flecha y el barreno de la manivela destinado a la flecha:

Elemento	D _{NOMINAL}	Tolerancia (Posición, calidad)	Diámetro máximo	Diámetro mínimo	Interferencia mínima (D _{MAX} - d _{MIN})	Interferencia máxima (D _{MIN} - d _{MAX})
Flecha	12.7*	h6	12.7 (d _{MAX})	12.689 (d _{MIN})	0.0	-0.011
Barreno Manivela	12.7*	P7	12.689 (D _{MAX})	12.671 (D _{MIN})		

Cuadro 5.3 Ajuste entre flecha y barreno de manivela.

*Diámetro nominal de la flecha. Se recomienda la medición del diámetro real de la flecha.

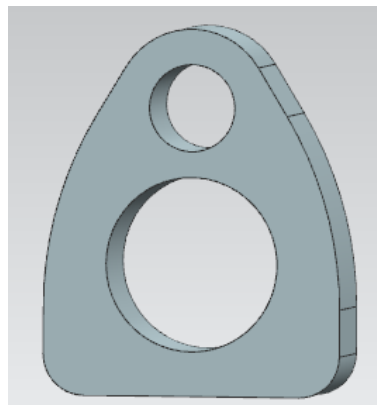


Figura 5.18 Manivela

5.2.5.- Volante de inercia

Las dimensiones del volante de inercia dependen de la inercia de la camisa, tal como Corella & Ramírez (2011) especifican, la inercia del volante debe seguir la relación especificada en la figura 5.19:

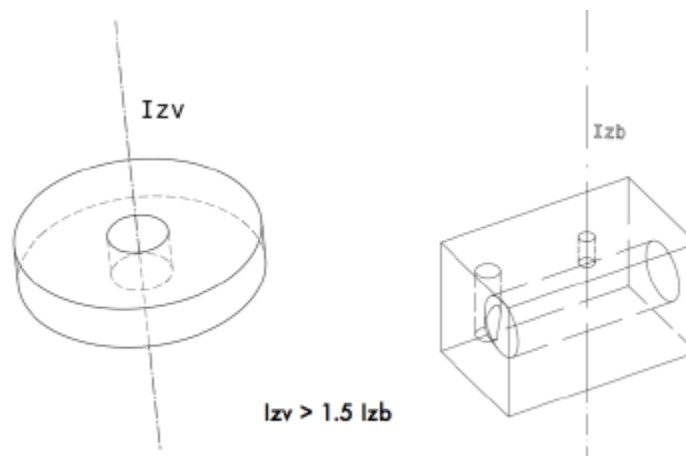


Figura 5.19 Relación entre la inercia del volante y la camisa (Corella & Ramírez, 2011).

Por lo tanto, mediante el uso de las aplicaciones de *NX 10®*, se obtiene la inercia de la camisa sobre su eje de rotación (fig. 5.20):

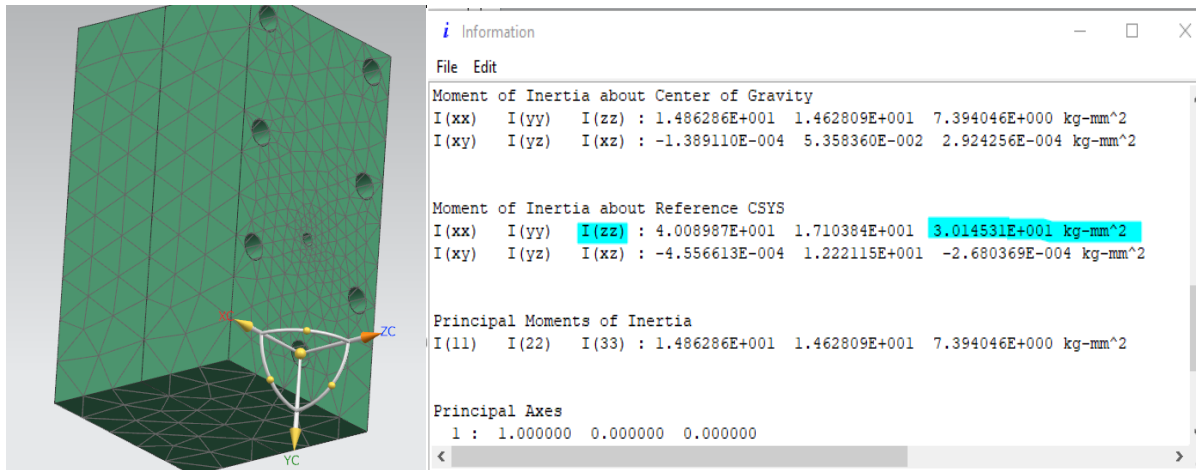


Figura 5.20 Camisa con sistema de referencia ubicado en eje de giro. Se observa en la ventana la inercia correspondiente al eje de giro.

El valor del momento de inercia en el eje de giro de la camisa:

$$I_{zz \text{ Camisa}} = 30.145 \times 10^{-6} \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}$$

En cuanto a la inercia del volante, se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$I_{zz \text{ Volante}} = \frac{M}{2} (R_1^2 + R_2^2) \tag{1}$$

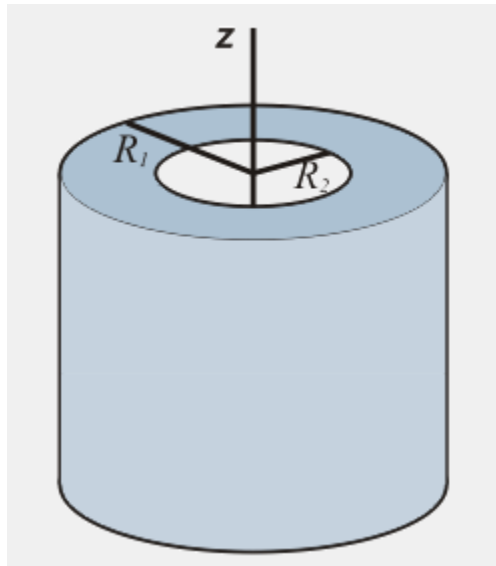


Figura 5.21 Cilindro hueco (Martín & Serrano, 2014).

De la expresión anterior, tenemos que la masa depende de las dimensiones del volante, por lo que podemos expresarla de la siguiente manera:

$$M = \rho \cdot V = \rho(e \cdot (\pi(R_2^2 - R_1^2))) \quad (2)$$

Donde:

$I_{zzVolante}$ es el momento de inercia del volante

M es la masa del volante

ρ es la densidad del aluminio

V es el volumen del disco

e es el espesor de la solera

R_1 es el radio interno del disco

R_2 es el radio externo del disco

Retomando la relación entre la inercia del volante y la inercia de la camisa, podemos escribir la siguiente inecuación:

$$I_{zzVolante} > 1.5 \cdot I_{zzCamisa} \quad (3)$$

Sustituyendo (1) en (3):

$$\frac{M}{2}(R_1^2 + R_2^2) > 1.5 \cdot I_{zzCamisa} \quad (4)$$

Sustituyendo en (4) la masa por la expresión (2) se obtiene lo siguiente:

$$\frac{1}{2}(R_1^2 + R_2^2) \cdot \rho(e \cdot (\pi(R_2^2 - R_1^2))) > \frac{3}{2} \cdot I_{zzCamisa} \quad (5)$$

En la inecuación, la incógnita es el radio externo, representado por " R_2 ", por lo que se despeja de la inecuación (5):

$$(R_1^2 + R_2^2) \cdot (R_2^2 - R_1^2) > \frac{3}{\rho \cdot e \cdot \pi} \cdot I_{zzCamisa}$$

$$(R_2^4 - R_1^4) > \frac{3}{\rho \cdot e \cdot \pi} \cdot I_{zzCamisa}$$

$$R_2^4 > \frac{3}{\rho \cdot e \cdot \pi} \cdot I_{zz \text{ Camisa}} + R_1^4$$

$$R_2 > \sqrt[4]{\frac{3}{\rho \cdot e \cdot \pi} \cdot I_{zz \text{ Camisa}} + R_1^4} \quad (6)$$

Si $\rho = 2700 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$, $e = 0.0127[m]$, $I_{zz \text{ Camisa}} = 30.145 \times 10^{-6} [kg \cdot m^2]$ y $R_1 = 0.00635[m]$.
sustituyendo en (6) para obtener el radio externo mínimo R_2 :

$$R_2 > 0.0303 [m]$$

De manera que el diámetro del volante de inercia debe ser mayor a 60.6 milímetros. Se opta por un volante (fig. 5.22) con un diámetro de 65 milímetros con ajuste de interferencia P7/h6 entre el barreno del volante y la flecha.

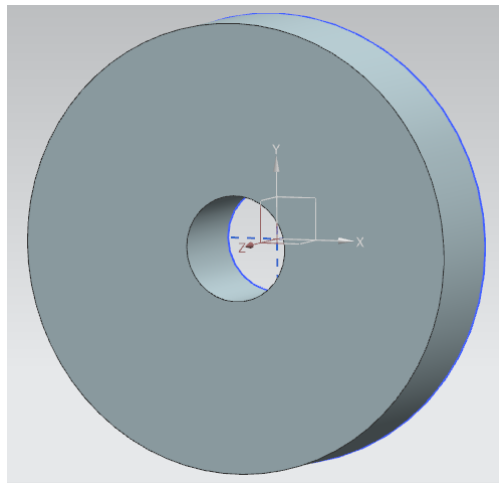


Figura 5.22 Volante de inercia.

5.2.6.- Soporte horizontal

Debido a la configuración del motor, el funcionamiento del motor va acompañado de vibraciones. Por tal motivo, se propone el uso de soportes horizontales del tamaño del soporte vertical (fig. 5.23). Sus dimensiones son 90mm x 10mm x 12.7mm.

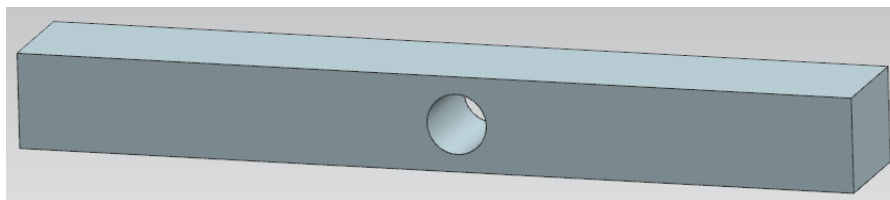


Figura 5.23 Soporte horizontal.

5.2.7.- Flecha

La flecha (fig. 5.24) es un componente que interactúa con la camisa, el volante de inercia y el soporte vertical. Para el modelo propuesto, se toman las dimensiones de una barra de perfil circular de media pulgada, de manera que no se realicen procesos a la barra, sino que los demás elementos se adapten a las dimensiones de la barra. Sus dimensiones son: D12.7 x 32mm. Se recomienda realizar chaflanes en los bordes de la flecha para facilitar su ensamble.

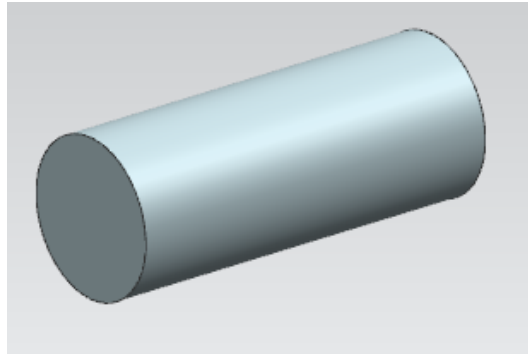


Figura 5.24 Flecha.

5.2.8.- Motor ensamblado

En este apartado se encuentra el motor ensamblado, omitiendo los componentes de tornillería (fig. 5.25).

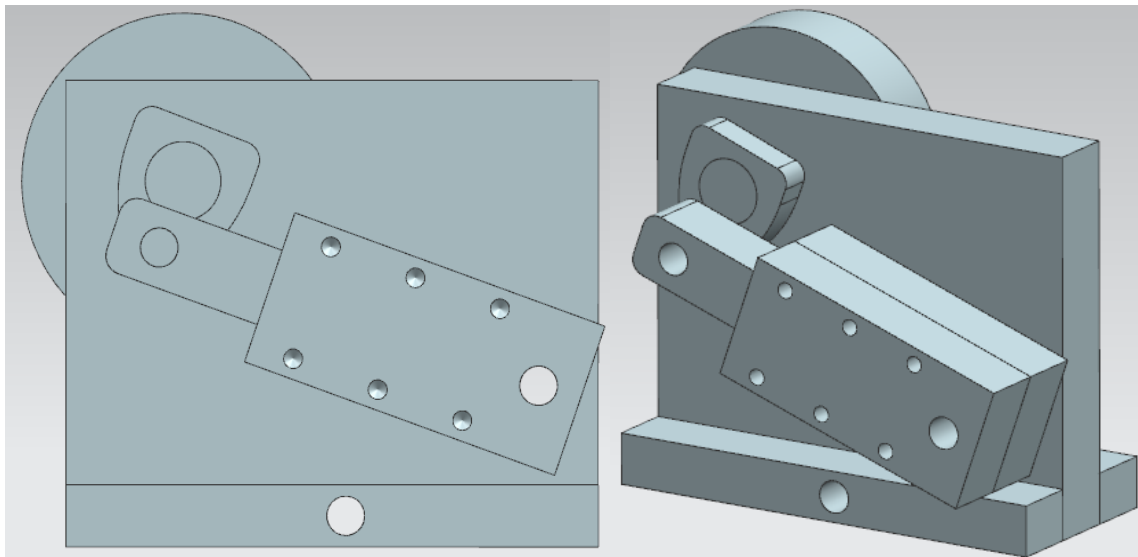


Figura 5.25 Motor ensamblado

5.3.- Generación de trayectorias de maquinado y prototipado

Posteriormente, teniendo definido el modelo a desarrollar, se comenzó con la generación de trayectorias para la manufactura del prototipo. La manufactura se realizará sobre una misma solera, de tal manera que se monte una sola vez la pieza de trabajo y se obtengan la mayor cantidad de componentes en una sola sesión de maquinado. En esta etapa se tuvieron presentes los siguientes lineamientos:

- Menor densidad de líneas, menor tiempo de manufactura. En este apartado la densidad de líneas hace referencia al número de líneas del código generado (Campos, et al., 2017).
- Simplificar el proceso de producción puede conservar recursos (Okala Practitioner, 2012)
- Uso de cortadores más grandes permite realizar el proceso de manufactura más rápido.

De igual manera, se consideraron las siguientes herramientas:

- Cortador de 1/4": se elige el diámetro tomando en cuenta el aumento de la solera si se usa un cortador de mayor diámetro.
- Broca de 1/2": usada para los barrenos donde se encuentren interacciones con la flecha.
- Broca de 1/8": usado para barrenos en ejes de giro y para barrenos dedicados al roscado de la cuerda de 5/32-32 NS.
- Broca #20: broca usada en camisa para los tornillos que logran el sellado en la camisa, de tal manera que los barrenos y los tornillos presenten un ajuste de holgura.
- Broca de 1/16": usada en los barrenos de expulsión/admisión del motor.

A continuación, se muestran las distintas iteraciones realizadas. A cada iteración se le nombró MD (motor didáctico). Los modelos MD1 y MD2 mantienen la misma geometría de los componentes, sólo presentan cambios en la etapa de generación de trayectorias de corte debido al cambio de orientación de los componentes sobre la pieza de trabajo y debido al cambio de estrategia de corte. Del modelo MD3 al modelo MD6 hay cambios en la geometría de los componentes y en las trayectorias de corte generadas detalladas en las siguientes secciones.

5.3.1.- MD1

Considerando las herramientas seleccionadas y la materia prima, se generaron las siguientes trayectorias (fig. 5.26) con las características descritas para el modelo MD1(ver anexo 2 para características de trayectorias generadas):

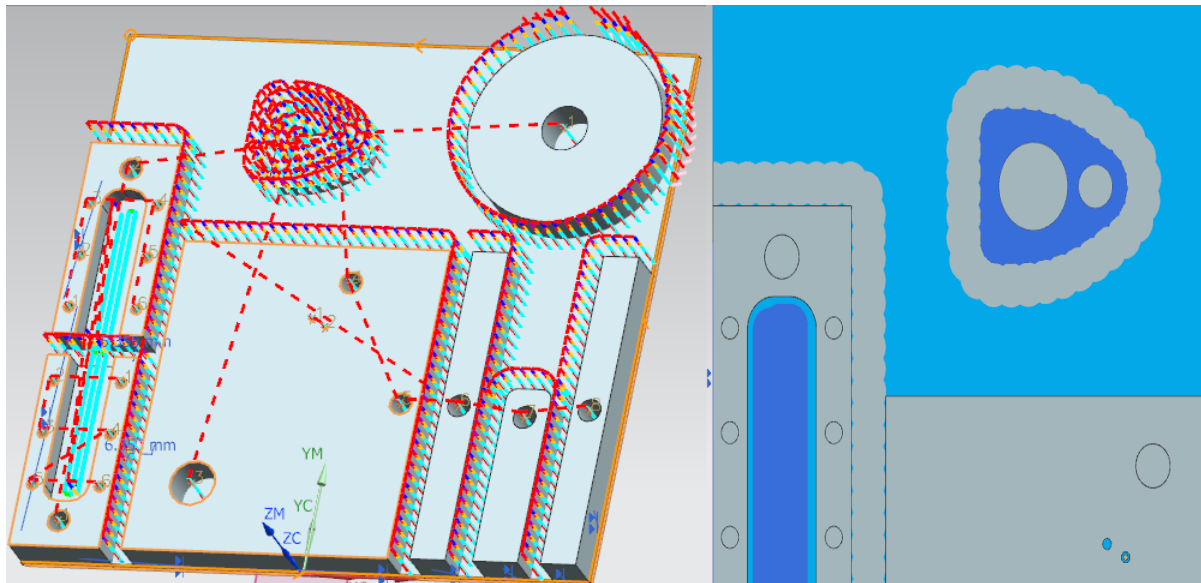


Figura 5.26 Trayectorias generadas usando corte en eje Z – MD1.

Se usa fresado por inmersión, o *plunge milling* como operación de fresado, que consiste en una entrada vertical del cortador hasta la profundidad final. El corte vertical ayuda a reducir la vibración durante el proceso, reduce la deflexión en la herramienta y logra remover grandes cantidades de material en máquinas de baja potencia (Sandvik Coromant, 2019).

Los componentes se encuentran orientados de tal manera que se aprovechen los lados en común, de tal manera que la herramienta corte dos lados simultáneamente (fig. 5.26 dcha.). Se observa que las operaciones de barrenado se encuentran ubicadas aleatoriamente.

El código generado presentó un tamaño de 33 KB, con 2108 líneas sin encabezados y una duración de 2h22min (Ver anexo 2).

5.3.2.- MD2

Al ver que el código de las trayectorias se encontraba fuera de especificaciones, se optó por cambiar la operación de fresado por inmersión o *plunge* a fresado de cavidad, de tal manera que simplificara los múltiples pasos que se realizaba en la primera iteración, dando como resultado la propuesta MD2:

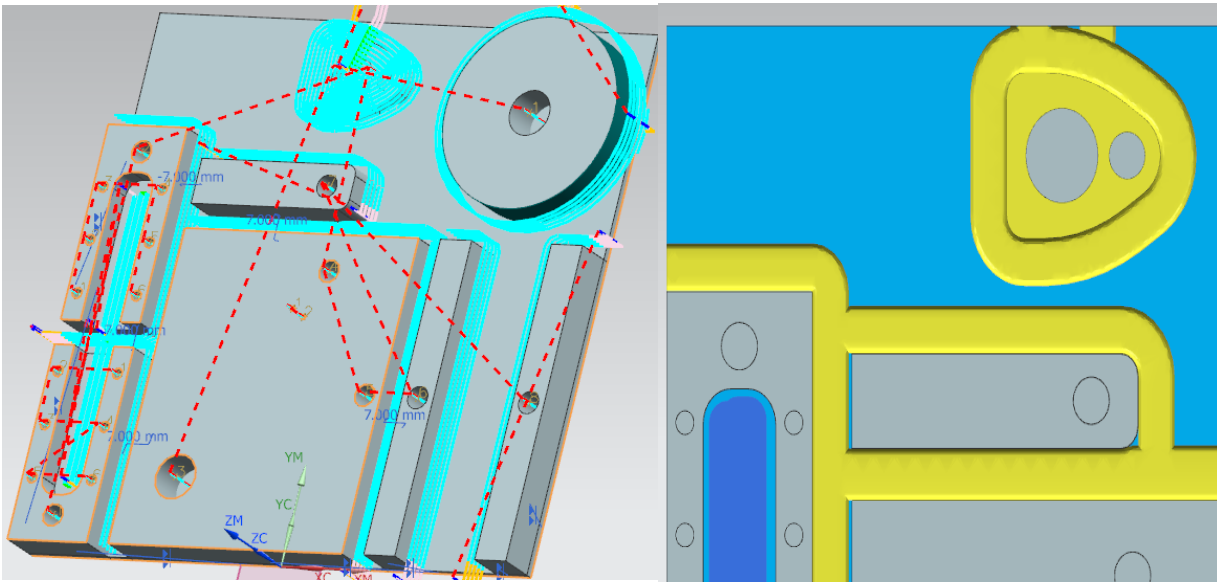


Figura 5.27 Trayectorias generadas mediante el uso de corte horizontal – MD2.

Se usa como estrategia de corte el seguimiento de periferia (*Follow Periphery*) para generar una menor cantidad de código, además de hacer que las trayectorias ocupen el menor espacio posible. Debido a su forma, la manivela usa el seguimiento de parte (*Follow Part*) como estrategia de corte.

La ubicación de las piezas se mantiene, pero debido al cambio de estrategia, el código resultante tuvo un peso de 39 KB, con una mejora en la cantidad de líneas, de 2108 en el modelo MD1 a 1436. Sin embargo, las operaciones no se encuentran en un orden en particular, presentándose como oportunidad en la generación de trayectorias. La duración del maquinado en la simulación mejora considerablemente, de 2h22min a 1h24min (ver anexo 2).

5.3.3.-MD3

Posteriormente, al tener definidas las estrategias de corte además de considerar el uso de la VMC-300 con la prensa instalada, se cambiaron las dimensiones de la solera usada de manera que sea posible manufacturar el motor en la prensa de menor dimensión del LMA, pasando de 6" x 6" x 1/2", a una de 4"x 8 1/4" x 1/2" (ver figura 5.28). De igual manera, el sustraer las piezas de la solera de aluminio requiere ciertas condiciones para no comprometer el desempeño de la máquina, como el desprendimiento de las piezas durante el maquinado de la periferia, o la deformación de la solera por la pérdida de soporte. Ésta incluye el cambio de configuración en el motor, de diagonal a horizontal, ocasionando una reducción de dimensiones en la base vertical. Se crea el modelo MD3 (fig. 5.28). Se observa la implementación de costillas entre las piezas, de tal manera que mientras las piezas son maquinadas de la pieza de trabajo, se mantengan sujetas entre sí y entre la prensa de la máquina.

De igual manera se puede observar en las trayectorias de corte de fresado y de taladrado se encuentran ordenadas de tal manera que eviten movimientos.

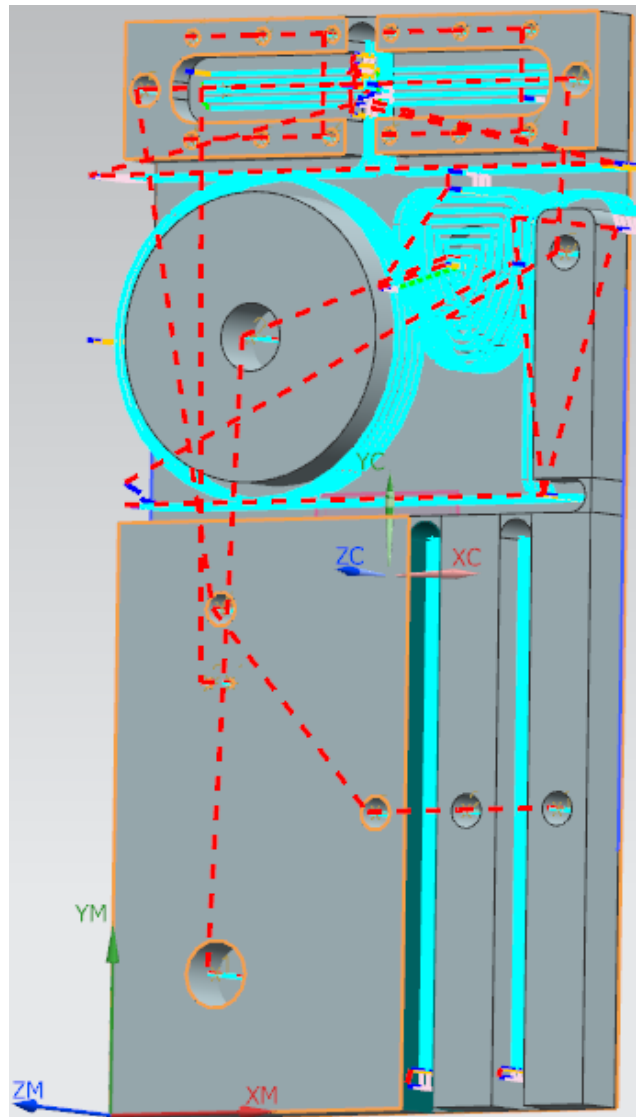


Figura 5.28 Trayectorias generadas considerando unión de elementos para dar solidez a la pieza – MD3.

Aquí el tamaño del código se reduce a 33 KB, y se logra mejorar la cantidad de líneas dando un total de 1348. En el tiempo de maquinado resultado de la simulación tiene como duración 1h1min (ver anexo 2).

5.3.4.- MD4

Del modelo MD3, se propone reducir las dimensiones del soporte horizontal de tal manera que ocupen un menor espacio en la pieza de trabajo. De igual manera, en este modelo se reduce la cantidad de herramientas usadas para la fabricación.

Soporte (2): se determina que se puede reducir el tamaño del soporte, creando un diseño más compacto e igual de funcional. Puesto que éstos sostienen al motor mientras no se encuentre en funcionamiento, ya que las vibraciones intrínsecas del sistema obligan al usuario a sujetar el motor. El modelo resultante se muestra en la figura 5.29.

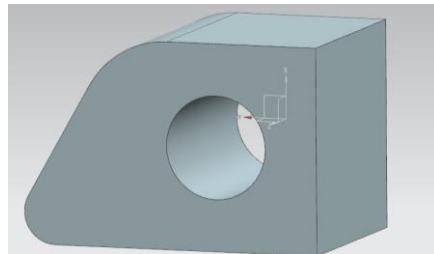


Figura 5.29 Soporte horizontal.

Manivela: En el nuevo modelo, se añade un separador alrededor del barreno de $\frac{1}{2}$ ", de manera que el área en contacto con la base vertical sea menor, reduciendo la fricción. De igual manera, se introduce una cavidad para la cabeza del tornillo que une a la manivela con el pistón. Esto para evitar interferencia en el movimiento de la manivela. En la figura 5.30 se muestra el modelo con los cambios descritos.

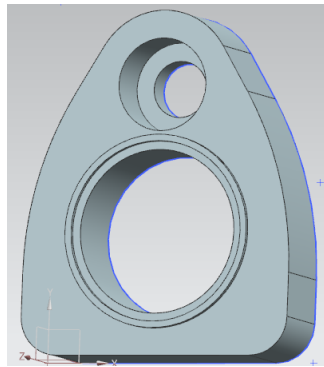


Figura 5.30 Manivela.

Después de observar la distribución de las trayectorias de corte, se opta por dejar un marco a cada pieza de al menos un milímetro (ver figura 5.31 dcha.) de tal manera que el maquinado no deforme las piezas adyacentes ocasionando cambios en las dimensiones. Para optimizar el espacio entre elementos, se elige un cortador de $\frac{3}{16}$ " para el desbaste de contorno para cada pieza.

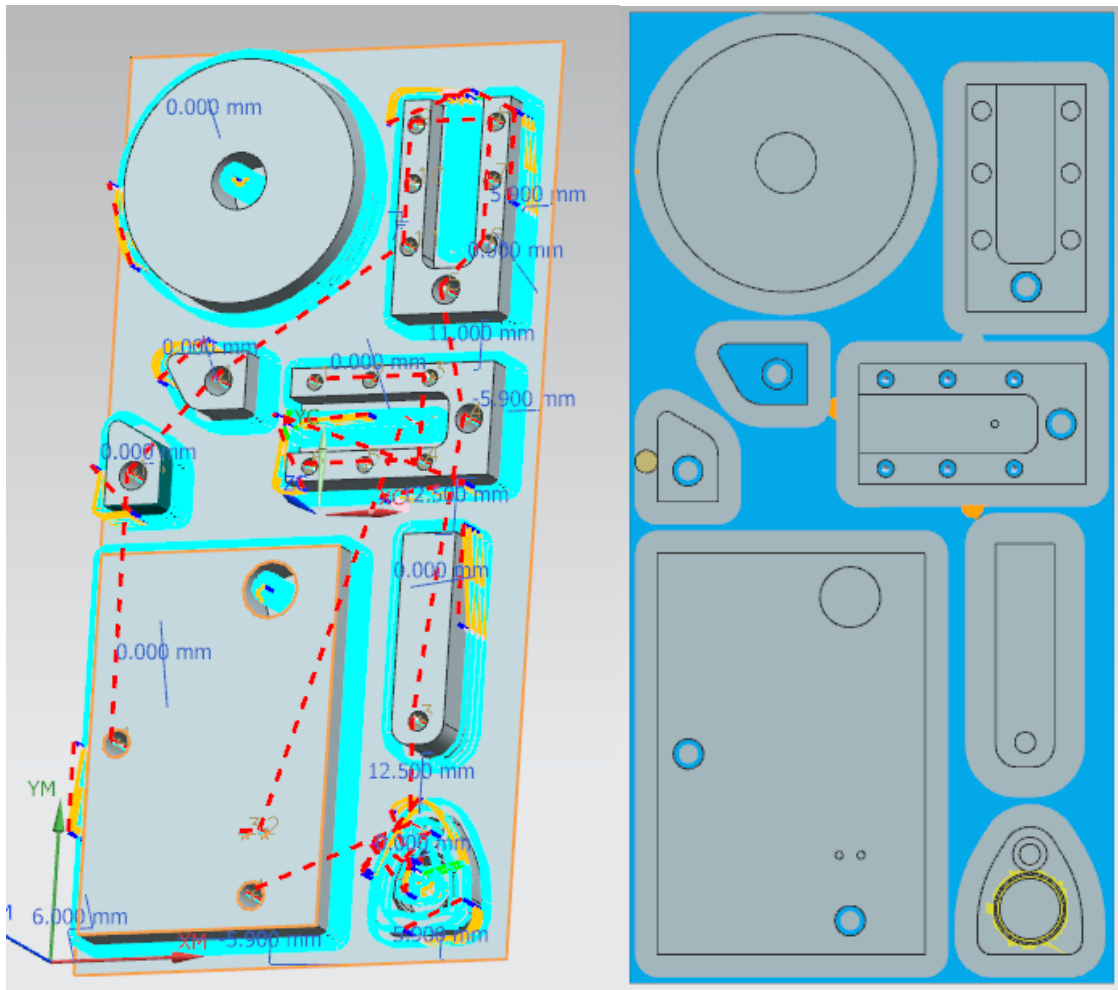


Figura 5.31 Trayectorias generadas considerando marco para cada pieza – MD4.

Una vez definidas las trayectorias de corte y los parámetros de corte, se procede a fabricar el modelo MD4 mediante el uso de las siguientes herramientas y materiales:

- Solera 4" x 1/2" x 22 cm
- Solera 4" x 1/4" x 12 cm
- Cortador vertical 1/4"
- Cortador vertical 3/16"
- Broca 1/8"

De la fabricación de este modelo, se espera validar la interacción entre la camisa y el pistón mediante una junta prismática, así como el sellado en la cavidad y la factibilidad de realizar las piezas separadas mediante un marco y un espesor de piso para evitar el

uso de material de sacrificio. En la figura 5.32 se muestra la pieza de trabajo montada en la prensa usada para el maquinado.

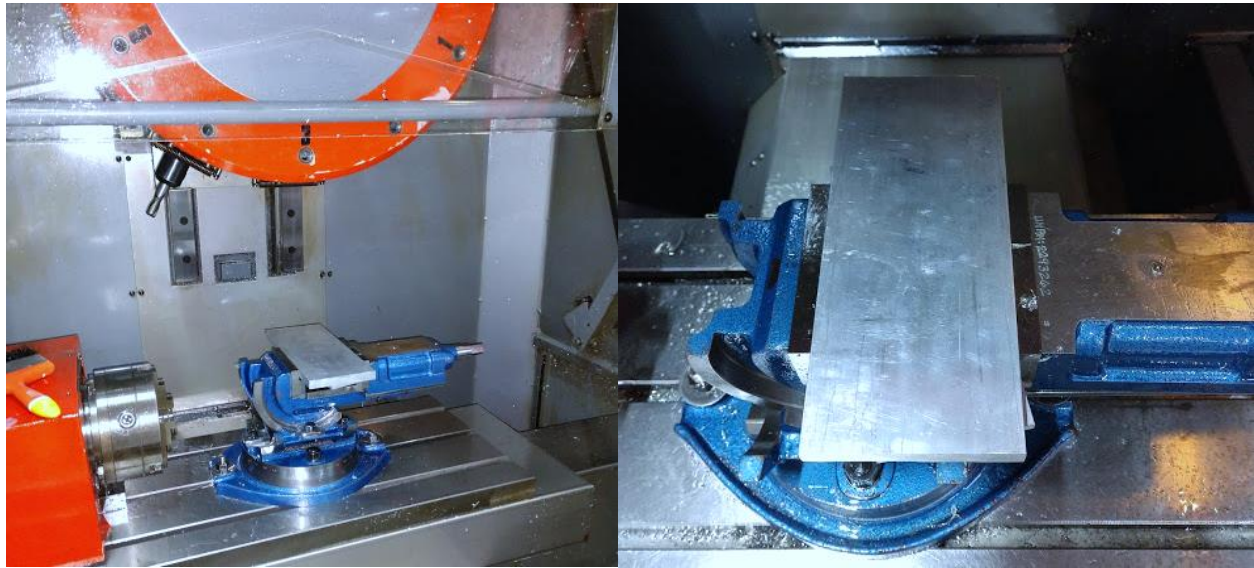


Figura 5.32 Solera montada sobre fresa VMC 300.

En el siguiente cuadro se muestran los parámetros usados, el tiempo de manufactura simulado en *NX 10* y el tiempo real de manufactura:

Modelo	Parámetros de corte	Tiempo de manufactura (simulación)	Tiempo real de manufactura	Número de herramientas (en CNC)
MD4	Cortador 1/4": N= 3000 RPM Vf= 150 mmpm Cortador 3/16": N= 3500 RPM Vf= 100 mmpm Broca 1/8": N= 1200 RPM Vf= 60 mmpm	1h47min	4h30min	3

Cuadro 5.4 Datos de manufactura de modelo MD4.

Durante la manufactura del modelo MD4 se modificó el avance del cortador de 3/16", modificando el tiempo de manufactura previsto en la simulación de *NX 10*®. Esto debido a la cercanía del cortador con la prensa debido a las variaciones de las medidas nominales de la solera.

Respecto al código generado se presentó un aumento en líneas como del tamaño del archivo CNC resultando en 51.5 KB y 1396 líneas.

Al momento de retirar la solera de la fresa VMC 300, se observó que el soporte vertical, la manivela y el pistón no fueron retirados por las operaciones de fresado (fig. 5.33). De igual manera no fue posible retirarlos manualmente. Se requirió el uso de una sierra de joyero para retirarlos de la solera.

Una vez retiradas todas las piezas, se procede a limpiarlas, limar los bordes y lijar los componentes con interacción.

Al ensamblar los componentes, se observa que hay discrepancias en las dimensiones de la camisa y el pistón.

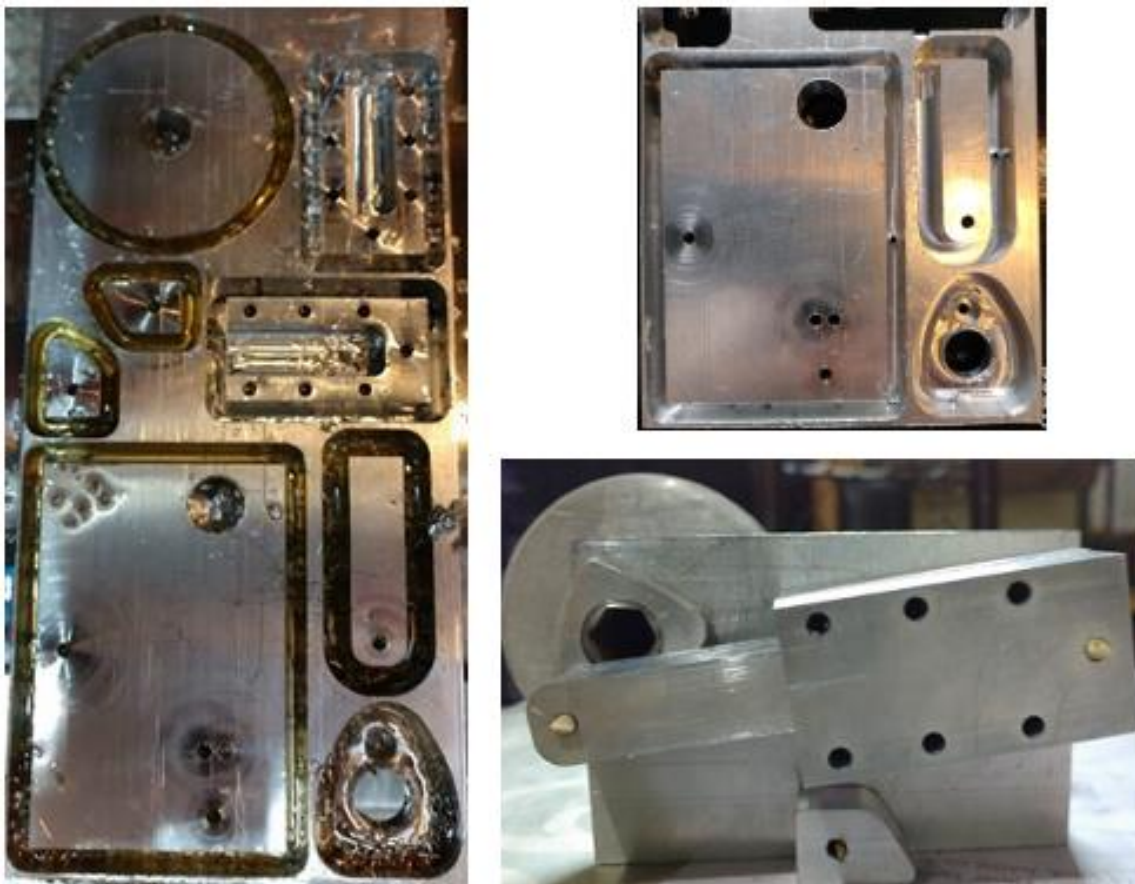


Figura 5.33 Resultados manufactura modelo MD4. En la figura superior derecha se aprecian los componentes que no pudieron ser separados de la solera manualmente.

En la figura 5.34 se muestra el pistón y la camisa, en la dimensión donde interactúan. En el cuadro 5.6 se presentan las medidas nominales contra las medidas obtenidas posterior a la manufactura.

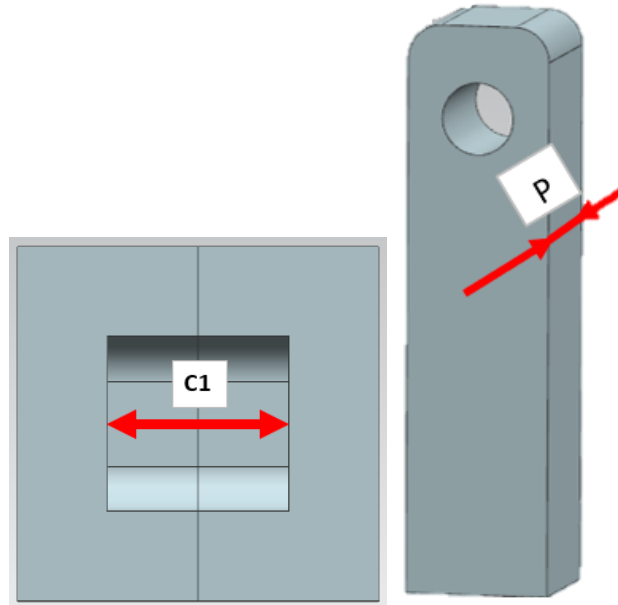


Figura 5.34 Pistón y camisa ensamblada. Se encuentran acotadas las dimensiones que presentaron variación. La dimensión P es paralela a la dimensión C1.

Identificador	Dimensión real	Dimensión nominal	Tolerancia [1×10^{-3}]	Dimensiones límite	Variación ($ D_{real} - D_{nominal} $)
C1	13.905	12.7	G7(+24,+6)	(12.706,12.724)	1.205
P	12.595	12.7	h6 (+0,-11)	(12.689,12.700)	0.215

Cuadro 5.5 Comparación de dimensión real y nominal. Las dimensiones y tolerancias se encuentran en mm.

Del cuadro 5.5 podemos observar que la variación de las dimensiones C1 y P se encuentran fuera del rango de tolerancia definido. Entre ellas se tiene un juego de 1.31 mm, que comparado con el juego máximo de 0.035 mm definido en el apartado 5.2.2 ocasiona la pérdida del sellado entre el pistón y la camisa.

Posterior al análisis realizado en los componentes maquinados, se determina que la variación se debió a las siguientes causas:

- Variación en las dimensiones de la solera
- Desviación angular de la prensa donde se maquina

Si bien se comprobó que la camisa armada puede mantener el sellado, se identifica como área de oportunidad la disminución de área de contacto entre el pistón y la camisa, tal que la fricción ocasionada se vea disminuida.

Se procede a desarrollar el siguiente modelo donde se considera de antemano las dimensiones de la materia prima y se cambia la geometría del pistón.

5.3.5.- MD5

Pistón: para reducir la fricción entre el pistón y la camisa, se propone la reducción del área de contacto como se muestra en la figura 5.35:

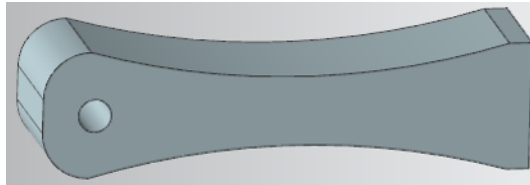


Figura 5.35 Pistón.

El cambio en los componentes hizo necesario la generación de trayectorias de corte. En este modelo se exploró la implementación de operaciones dedicadas al desbaste final para cada contorno, al igual que se realizan barrenos con el cortador de 3/16", resultando en un aumento en el tamaño del código de 51.5 KB en la propuesta MD4 a 80 KB.

Se fabricará la propuesta MD5 mostrada en la figura 5.36:

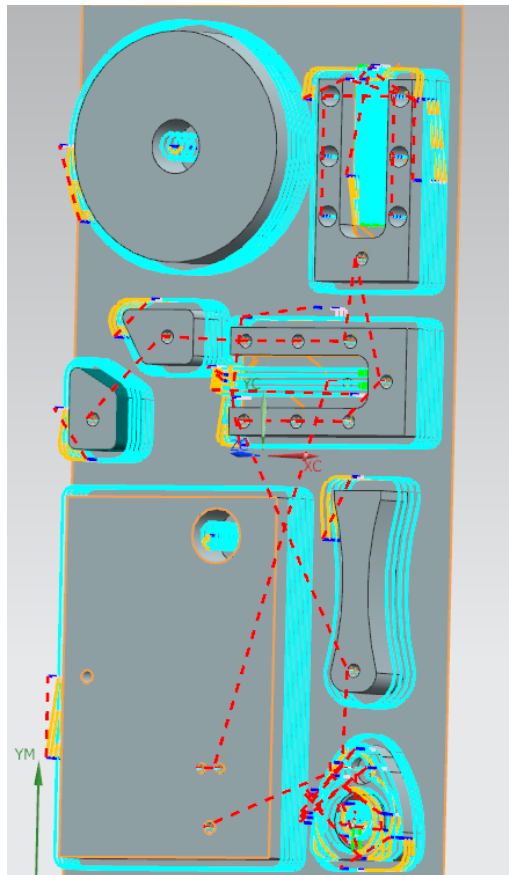


Figura 5.36 Trayectorias generadas con cambios en la manivela, pistón – MD5.

Para la fabricación del modelo MD5 se usa una solera de sacrificio, de tal manera que las piezas sean retiradas sin necesidad de tomar en cuenta el espesor de la solera, que varía en su extensión.

En el cuadro 5.6 se observan que los parámetros de corte se mantienen, pero a diferencia del modelo MD4 sólo se redujo la velocidad de avance del cortador de 3/16", reflejándose en una reducción de tiempo de 4h30min a 3h20min. Sin embargo, la mejora del tiempo se ve mermada por el aumento en el tamaño del código de 51 KB a 80 KB y de líneas de 1396 a 2921.

Modelo	Parámetros de corte	Tiempo de manufactura (simulación)	Tiempo real de manufactura	Número de herramientas (en CNC)
MD5	Cortador 1/4": N= 3000 RPM Vf= 150 mm/m Cortador 3/16": N= 3500 RPM Vf= 100 mm/m Broca 1/8": N= 1200 RPM Vf= 60 mm/m Broca 1/16": N= 1500 RPM Vf= 15 mm/m	2h5min	3h20min	4

Cuadro 5.6 Datos de manufactura de modelo MD5

Si bien la implementación de operaciones para extraer los componentes del motor buscaba cuidar el proceso mediante reducción de avances, se observó que el material de sacrificio evita que las piezas salgan de manera abrupta y la colisión con las barras paralelas, presentándose una oportunidad de mejora.

En cuanto a los componentes (fig. 5.37), se corrigió la variación de las piezas debido a la inclinación de la prensa y a la variación de las dimensiones de la solera.

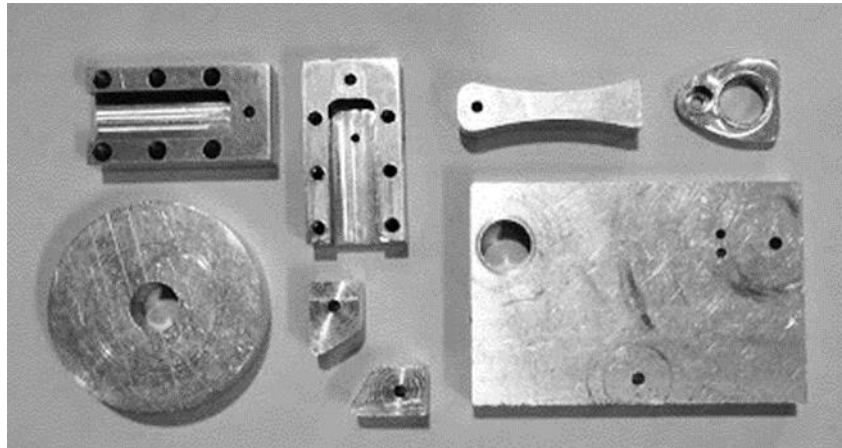


Figura 5.37 Componentes maquinados del modelo MD5.

Al momento del ensamble del motor (fig. 5.38), se observó que existía cierto juego entre el pistón y la camisa que evitaban el sellado de la camisa. Se determinó que el juego existente se debía al lijado y limado en exceso, de manera que se habían alterado las dimensiones del pistón. Debido a la pérdida de funcionalidad del pistón se procedió a maquinar uno nuevo para resolver el problema. Ensamblado el motor, se realizó una prueba donde se le inyectó aire comprimido para observar su funcionamiento. El motor funciona, pero el hecho de usar dos soportes horizontales no evitaba que se moviera debido a las vibraciones ocasionadas por la configuración del motor, siendo necesario sujetarlo manualmente.

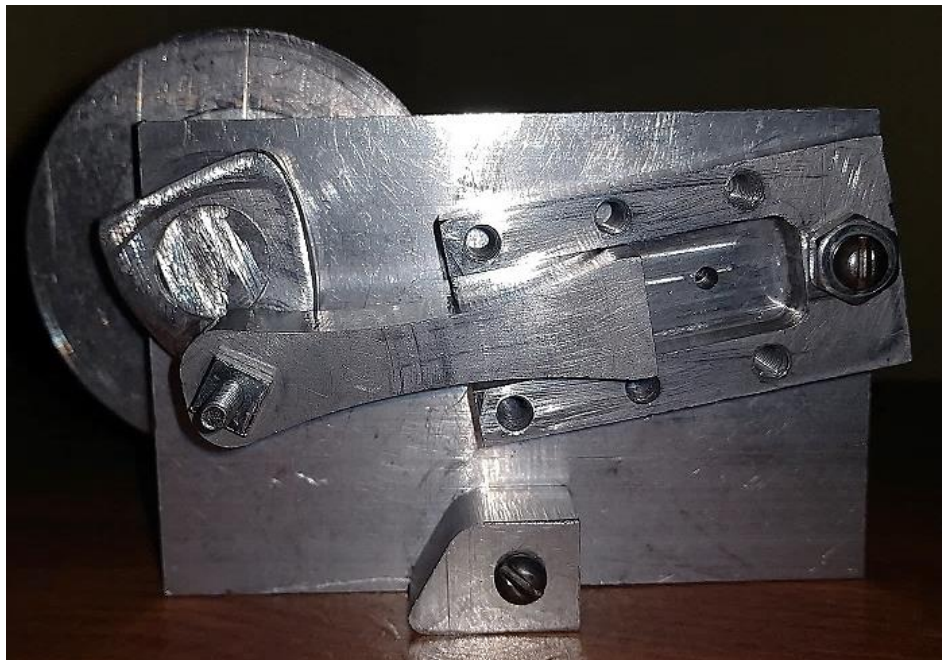


Figura 5.38 Modelo MD5 ensamblado con camisa descubierta.

5.4.- Modelo final – MD6

5.4.1.- Rediseño de componentes

El modelo MD5 funciona, sin embargo, se presentaron oportunidades de mejora: el tamaño del área de contacto del pistón y la sujeción manual del motor en funcionamiento.

Se propone el aumento del área de contacto de manera que, en el proceso de limado y lijado las dimensiones no se vean comprometida, dando como resultado el modelo de pistón mostrado en la figura 5.39:

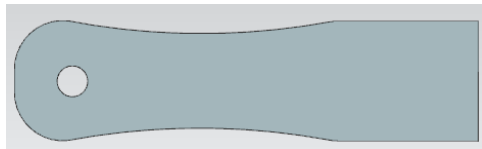


Figura 5.39 Pistón correspondiente a modelo MD6.

Así mismo, el soporte horizontal se reduce a un sólo elemento debido a las vibraciones causadas por la configuración del motor, especialmente la camisa, que presenta un giro no baricéntrico. Consecuentemente, se vuelve necesario mantener fijo al motor manualmente. El modelo MD5 presenta dificultades para la sujeción manual debido a su tamaño reducido, por lo cual se implementa un cambio en la geometría de manera que permita la sujeción manual (fig. 5.40).

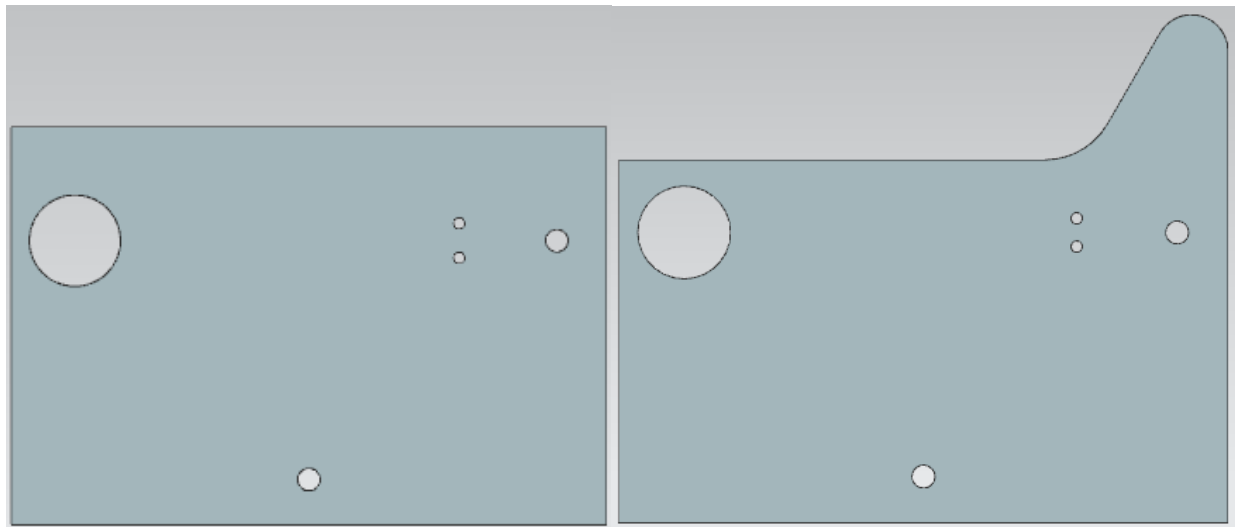


Figura 5.40 Cambios en soporte vertical, de MD5 a MD6.

Una vez determinados los cambios en las piezas se ensambla el motor, tomando en cuenta los componentes comerciales que los acompañan. En la figura 5.41 se puede observar el uso de un solo soporte horizontal, además de los componentes de tornillería del modelo.

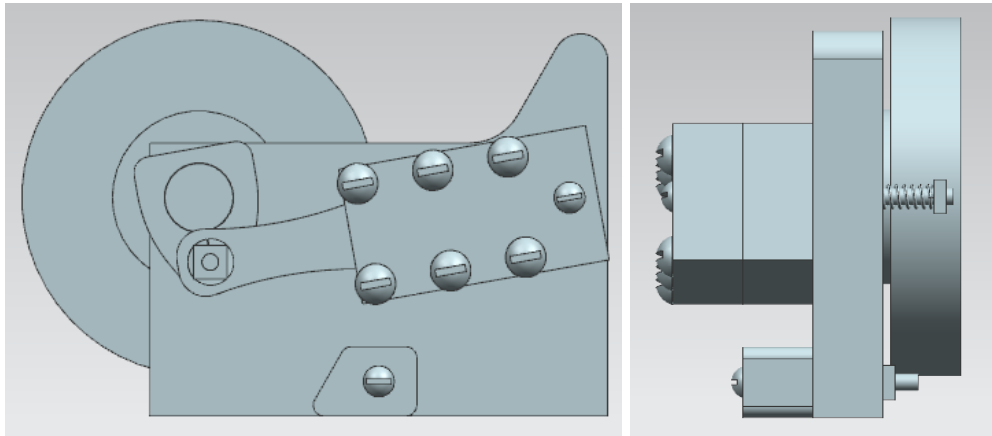


Figura 5.41 Vista frontal y lateral de modelo MD6.

5.4.2.- Generación de trayectorias y selección de herramientas

En cuanto a la simulación de trayectorias de corte, en el cuadro 5.7 se encuentran las herramientas usadas para el maquinado del motor, se decide cambiar la broca de 1/16" por una broca de centros #1 debido al uso del juego de boquillas ER40, no disponible para 1/16".



Figura 5.42 Juego de boquillas del LIMAC.

Herramientas usadas en CNC	Parámetros
Cortador recto de 1/4"	N=3000 rpm, Vf=150 mm/m
Cortador recto de 3/16"	N=3500 rpm, Vf=100 mm/m
Broca de 1/8"	N=1500 rpm, Vf=75 mm/m
Broca de centros #1	Ju7jmh

Cuadro 5.7 Parámetros de corte de herramientas usadas en sesión CNC. Para los cortadores y la broca de 1/8" se usó una velocidad de corte de 200 SFM (Oberg, et al., 2012). Para la broca de centros se usa una velocidad de corte de 10 m/min.

Una vez definidos los parámetros y las herramientas, se procede a generar las trayectorias de corte. En la figura 5.43 se observan las trayectorias para cada herramienta, así como el navegador de operaciones y la distribución de los componentes del motor.

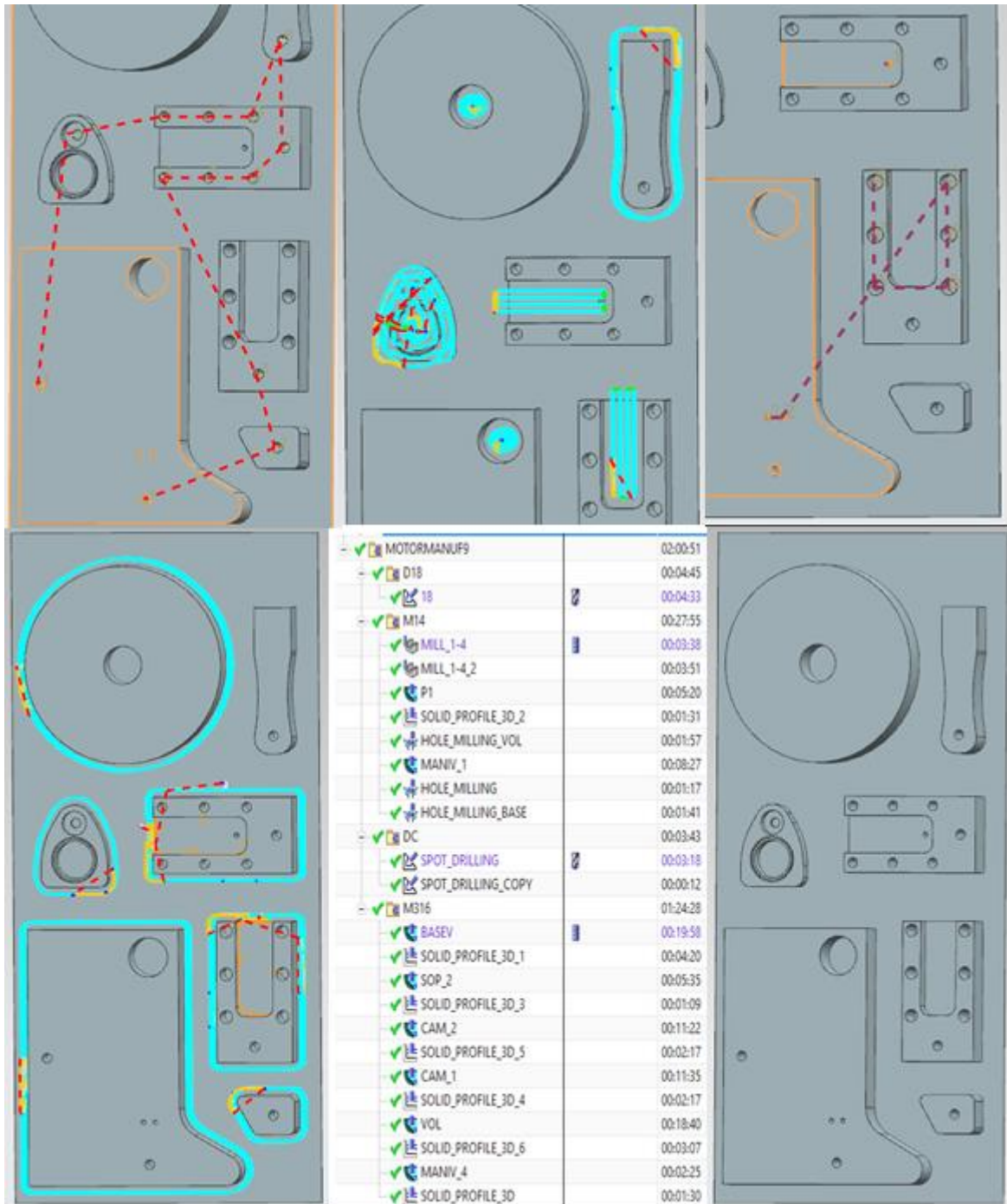


Figura 5.43 De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo: trayectorias de broca 1/8", trayectoria de cortador 1/4", trayectoria de broca de centros, trayectoria de cortador 3/16", navegador de operaciones de modelo final, distribución de componentes de motor.

Si bien se puede observar que el tiempo de manufactura se redujo en 4 minutos en comparación con el modelo MD5 la cantidad de operaciones aumentaron de 17 a 23, sin embargo, la cantidad de líneas se redujo de 2921 a 2121 líneas y el tamaño del código se redujo de 80 a 59 KB. Resultado de reducir un componente en el diseño y usar brocas para la realización de barrenos (ver anexo 2 para datos de los modelos).

Si bien se puede observar que el modelo MD1 tiene menor cantidad de operaciones que el modelo MD6, el tiempo de manufactura es menor y se tiene orden en la secuencia de operaciones, tomando en cuenta la ubicación de las piezas.

MOTORMANUF2	02:22:08	MOTORMANUF9	02:00:51
CAMISAINT	00:01:49	D18	00:04:45
SEPCAMISA	00:01:57	18	00:04:33
CONTCAMISA	00:07:18	M14	00:27:55
CONTBV	00:05:26	MILL_1-4	00:03:38
CCONTBH	00:02:51	MILL_1-4_2	00:03:51
CONTBH	00:02:29	P1	00:05:20
CONTPIS	00:00:44	SOLID_PROFILE_3D_2	00:01:31
MANCONT	00:40:22	HOLE_MILLING_VOL	00:01:57
CONTBV_COPY	00:28:15	MANIV_1	00:08:27
CAMISAS	00:13:38	HOLE_MILLING	00:01:17
CAMISAS_COPY	00:08:59	HOLE_MILLING_BASE	00:01:41
14	00:17:15	DC	00:03:43
12	00:07:54	SPOT_DRILLING	00:03:18
132	00:02:11	SPOT_DRILLING_COPY	00:00:12
		M316	01:24:28
		BASEV	00:19:58
		SOLID_PROFILE_3D_1	00:04:20
		SOP_2	00:05:35
		SOLID_PROFILE_3D_3	00:01:09
		CAM_2	00:11:22
		SOLID_PROFILE_3D_5	00:02:17
		CAM_1	00:11:35
		SOLID_PROFILE_3D_4	00:02:17
		VOL	00:18:40
		SOLID_PROFILE_3D_6	00:03:07
		MANIV_4	00:02:25
		SOLID_PROFILE_3D	00:01:30

Figura 5.43 Comparativa de número de operaciones entre modelo MD1 (izq.) y modelo MD6 (dcha.).

5.4.3.- Fabricación

Definidas las trayectorias de corte, se procede a fabricar el modelo en la VMC 300 (fig. 5.44). En el cuadro 5.8 se observan las características del modelo durante su manufactura.

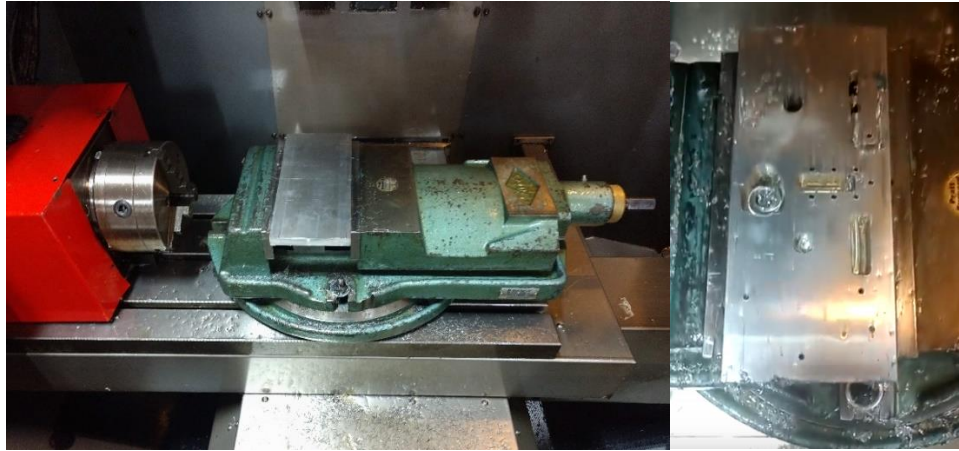


Figura 5.44 De izq. a dcha.: solera montada, solera con operaciones correspondientes a cortador 1/4" y brocas.

Modelo	Número de herramientas usadas en CNC	Tiempo de manufactura (simulación)	Tiempo de manufactura (real)
MD6	4	2h00min51s	2h38min55s

Cuadro 5.8 Duración de manufactura.

La variación entre la duración del maquinado en simulación contra el real se debe al montaje de la pieza de trabajo y de las herramientas.

Una vez terminada la sesión de maquinado, se procede al limado y lijado de las piezas para el ensamble (fig. 5.45).

A continuación, se listan los elementos comerciales necesarios para el ensamble del motor:

- Tornillo 1/8"x2" (1)
- Tornillo 1/8"x 1" (1)
- Tornillo 1/8"x3/4" (1)
- Tornillo 5/32"x3/4" (6)
- Rondanas cuadradas 1/8" (3)
- Rondana circular 1/2" (1)
- Rondana de presión 1/8" (1)



Figura 5.45 Partes del motor

En el cuadro 5.9 se encuentran desglosados el costo de la herramienta y material usado, así como los proveedores. En el concepto tornillería se encuentran las rondanas, el resorte y los tornillos usados. El costo total es de \$591.5 MXN, dentro del rango permisible de la especificación #3, menor a \$900.00 MXN.

Artículo	Proveedor	Costo (MXN)
Cortador recto 1/4"	LMA - UNAM	100
Cortador recto 3/16"	Ferretería Medina	120
Broca 1/8"		30
Broca de centros #1		40
Broca #20		20
Broca 1/16"		39
Machuelo 5/32-32 NS		86.50
Solera 1/2"x4"x22cm (Al)	Metales Díaz	100
Solera 4"x1/4"x12cm (Al)		20
Barra redonda 1/2"x3.2cm (Al)		16
Tornillería	Varios	20
TOTAL		591.5

Cuadro 5.9 Costos del prototipo

En el cuadro 5.10 se encuentra desglosado el costo de maquinado por cada componente, así como el total simulado y el total real del maquinado.

Componente	Tiempo de manufactura (s)	Costo (USD)
Soporte vertical	1656.56	27.61
Soporte horizontal	425	7.08
Camisa 1	1222	20.37
Camisa 2	1227.6	20.46
Volante	1424	23.7
Pistón	432	7.2
Manivela	837	13.9
TOTAL simulación	7224.16	120.32
Sesión completa	9535	158.92
Diferencia=Sesión completa - TOTAL	2310.84	38.6

Cuadro 5.10 Costo de maquinado. Basado en el valor de \$60 USD/h (Ulrich & Eppinger, 2013).

La diferencia de tiempo entre el tiempo de simulado y el tiempo de maquinado real se debe al montaje de la pieza de trabajo, la configuración de la máquina y al montaje y cambio de herramientas durante la sesión. El tiempo usado en la preparación para el maquinado y cambios para continuar representa un veinticuatro por ciento del total, representado por \$38.60 USD.

Se prueba el motor ensamblado de manera manual. Al girar el volante de inercia se observó que tiende a trabarse en el PMS, además de cierto juego entre la flecha y el soporte vertical, sin afectar su funcionamiento. Posteriormente, se aplicó lubricante en la camisa y en la flecha y se procedió a suministrar aire comprimido en una de las válvulas de admisión/expulsión del soporte vertical. Se impulsó manualmente el volante de inercia para el arranque y el motor funcionó. No se observan detalles que ameriten un rediseño.

En la figura 5.46 se muestra el ensamble del modelo final del motor.

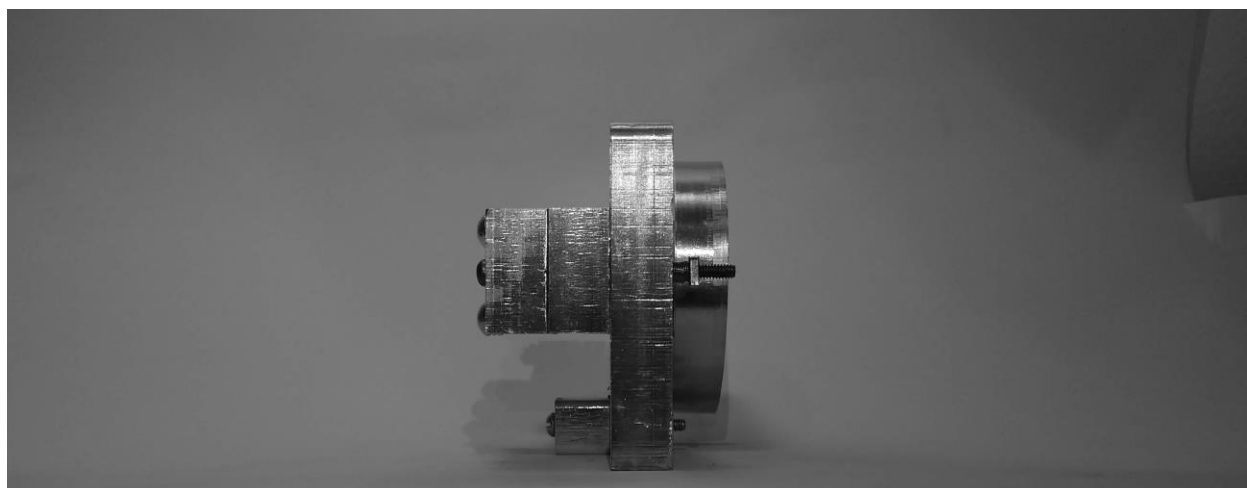
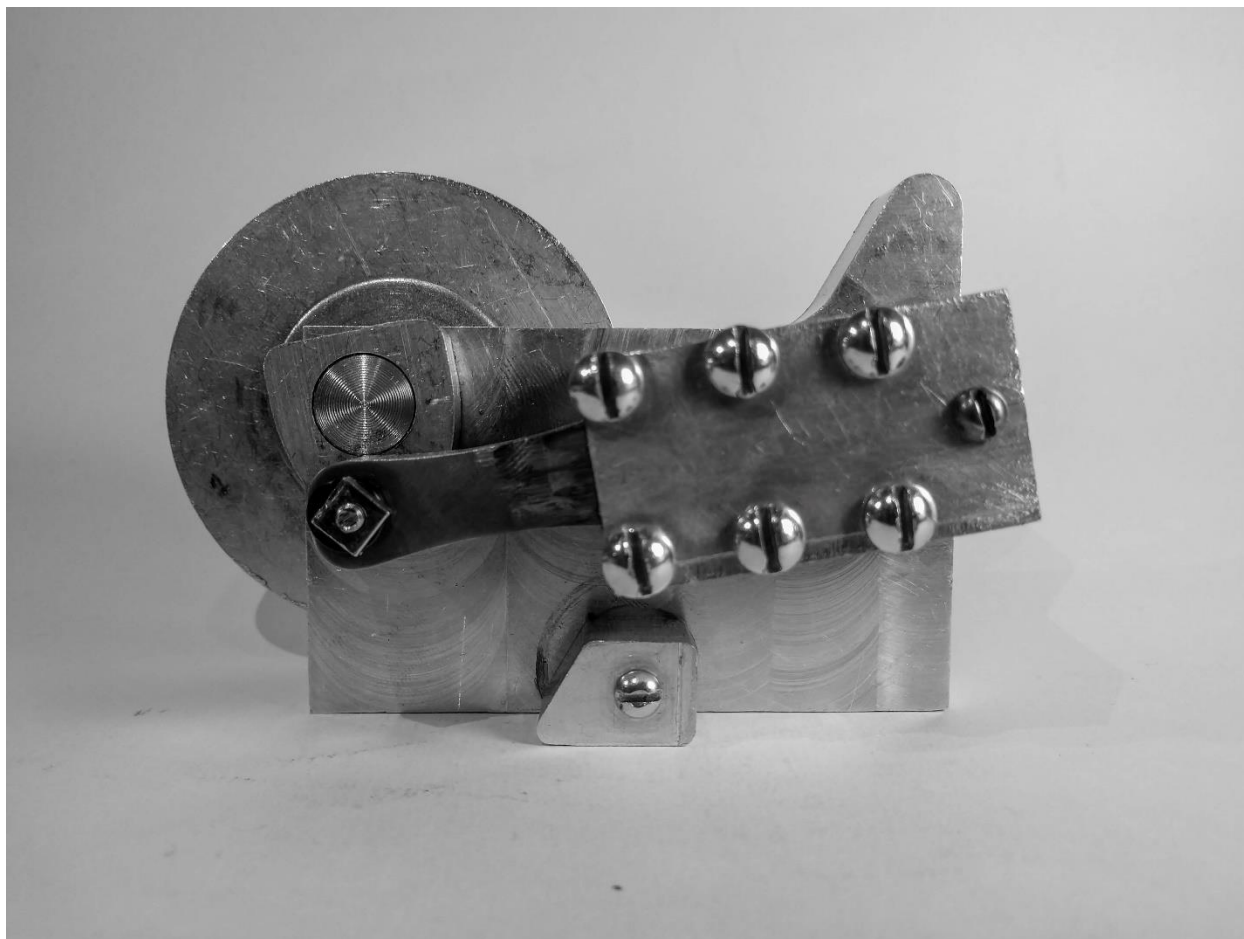


Figura 5.46 Motor modelo MD6 ensamblado

6.- Análisis de sustentabilidad

Los objetivos de realizar un estudio de sustentabilidad al diseño son los siguientes:

- Estimar el impacto ambiental del motor a través de las emisiones de CO2
- Comparar resultados con diseños existentes
- Identificar oportunidades de mejora en el diseño

Se toma como unidad funcional 1 año de servicio, considerando que el proyecto puede usarse en otras asignaturas como complemento. Se elige el reciclaje como proceso al final de vida, puesto que el aluminio puede refundirse sin pérdida notable en sus propiedades mecánicas.

Para la realización del estudio comparativo, se tomó en cuenta el peso de cada pieza considerando el espacio que ocupa la trayectoria del cortador, el marco correspondiente y el espacio sobrante de manera de manera que se empleara la extensión de la solera definida como pieza de trabajo (fig. 6.1).

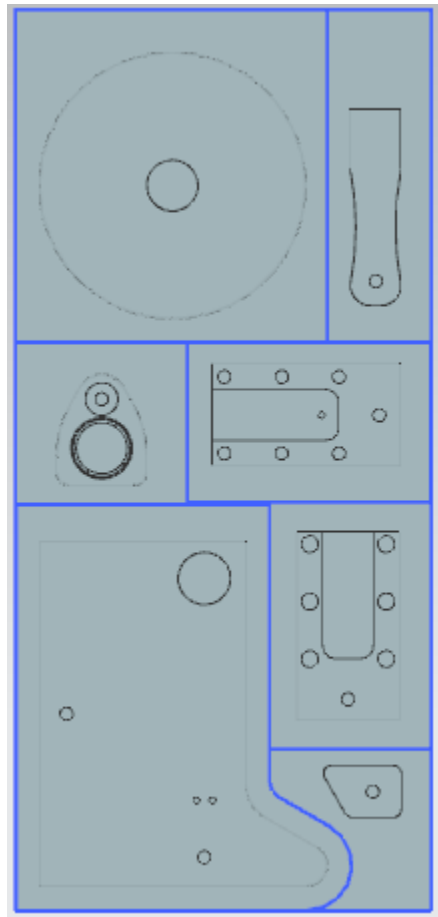


Figura 6.1 División de pieza de trabajo para cada componente del motor

De la división realizada, se generó una lista de materiales (ver anexo 3) con el peso de cada componente como se muestra en la división, así como los procesos realizados. Usando el peso de cada componente, así como los procesos de manufactura que se realizaron, se genera el siguiente cuadro (ver fig. 6.2) en *Sustainable Minds®*:




























Name	Material/Process	Qty	Amt	Unit	mPts	CO ₂ eq. kg	MS	Part ID	
+ <input type="checkbox"/> pistón	Aluminium, secondary, from 1	1	69.14	g	0.132	0.843	E	5	Process +   
+ <input type="checkbox"/> soporte horizontal	Aluminium, secondary, from 1	1	34.9	g	0.0666	0.426	E	7	Process +   
+ <input type="checkbox"/> manivela	Aluminium, secondary, from 1	1	56.6	g	0.108	0.690	E	4	Process +   
+ <input type="checkbox"/> volante de inercia	Aluminium, secondary, from 1	1	212.43	g	0.406	2.59	E	6	Process +   
+ <input type="checkbox"/> camisa 2	Aluminium, secondary, from 1	1	81.54	g	0.154	0.966	E	3	Process +   
+ <input type="checkbox"/> camisa 1	Aluminium, secondary, from 1	1	81.54	g	0.156	0.994	E	2	Process +   
+ <input type="checkbox"/> soporte vertical	Aluminium, secondary, from 1	1	230.25	g	0.440	2.81	E	1	Process +   
<input type="checkbox"/> eje	Aluminium, secondary, from 1	1	10.9	g	0.00280	0.0165	E	8	Process +   
<input type="checkbox"/> Solera sacrificio	Aluminium, secondary, from 1	1	209	g	0.0537	0.317	M	0	Process +   
Manufacturing total					1.52	9.65	E		

Figura 6.2 Lista de materiales (BOM) incluida en *Sustainable Minds®* (*Sustainable Minds*, 2019).

De la figura 6.2 se puede observar el nombre de los componentes del motor, así como el peso de cada uno (*Amt*), el puntaje basado en milipuntos (*mPts*) y un estimado de emisiones de dióxido de carbono por cada componente, que incluye la materia prima y los procesos de manufactura involucrados.

A todos los componentes se les agrega el reciclaje en el apartado de fin de vida, considerando el uso posterior de los componentes o del aluminio como materia prima.

Name	End of life method	Qty	Amt	Unit	mPts	CO ₂ eq. kg	MS	Part ID
+ <input type="checkbox"/> pistón	Aluminium, secondary, from 1	1	69.14	g	0	0	E	5
+ <input type="checkbox"/> eje	Aluminium, secondary, from 1	1	10.9	g	0	0	E	8
+ <input type="checkbox"/> soporte horizontal	Aluminium, secondary, from 1	1	34.9	g	0	0	E	7
+ <input type="checkbox"/> manivela	Aluminium, secondary, from 1	1	56.6	g	0	0	E	4
+ <input type="checkbox"/> volante de inercia	Aluminium, secondary, from 1	1	212.43	g	0	0	E	6
+ <input type="checkbox"/> camisa 2	Aluminium, secondary, from 1	1	81.54	g	0	0	E	3
+ <input type="checkbox"/> camisa 1	Aluminium, secondary, from 1	1	81.54	g	0	0	E	2
+ <input type="checkbox"/> soporte vertical	Aluminium, secondary, from 1	1	230.25	g	0	0	E	1
+ <input type="checkbox"/> Solera sacrificio	Aluminium, secondary, from 1	1	209	g	0	0	M	0
End of Life total					--	--	E	

Figura 6.3 Apartado "End of life" del motor fresado (*Sustainable Minds*, 2019).

Así mismo en el apartado de transporte (fig. 6.4), se considera la distancia que recorre el producto en sus distintas etapas a lo largo de su ciclo de vida (*Sustainable Minds*, 2019). Sin embargo, sólo se conoce la distancia recorrida del punto de venta de la materia prima hasta el LMA de la Facultad de Ingeniería, considerando un viaje en metro ida y

vuelta de la estación Universidad a Hospital General (Coordinación de Desarrollo Tecnológico, 2019).

Name	Transportation mode	Qty	Amt	Unit	mPts	CO ₂ eq. kg	MS	Part ID
Assembled product								
☐ Transportation mode	Train, freight, diesel		19434	m	0.160	1.65	E	

Figura 6.3 Apartado “Transportation” del motor fresado (Sustainable Minds, 2019).

En la figura 6.4 se muestra que la carga más grande respecto a los componentes y sus procesos corresponden a los procesos relacionados con el maquinado en CNC, y encontrándose en tercer lugar, las emisiones de dióxido de carbono generadas por el transporte. El motor fresado obtiene un puntaje de 1.7 mPts, con una huella de carbono estimada en 11 kg de CO₂ durante un año.

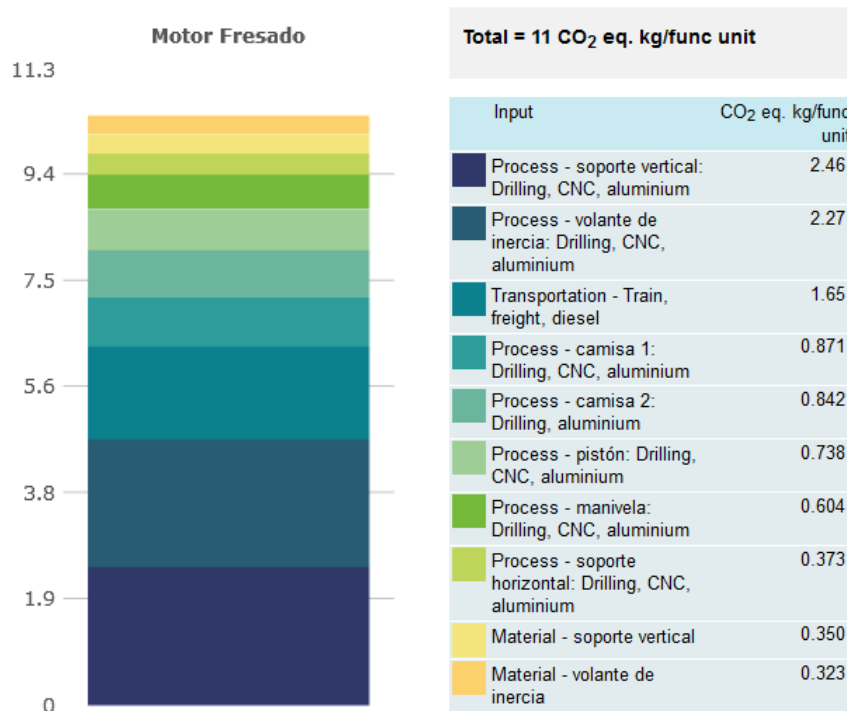


Figura 6.4 Resultados de impacto por componente de motor fresado (Sustainable Minds, 2019).

En cambio, en el motor X (Borja, et al., 2018) desarrollado con miras en la mejora de sustentabilidad, tiene un puntaje de 1.1 mPts y una huella de carbono estimada en 6.9 kg de CO₂ durante un año.

En la figura 6.5 se muestran los resultados del estudio, dados en impacto por componente del motor. Se observa que gran parte del impacto se debe al maquinado CNC.

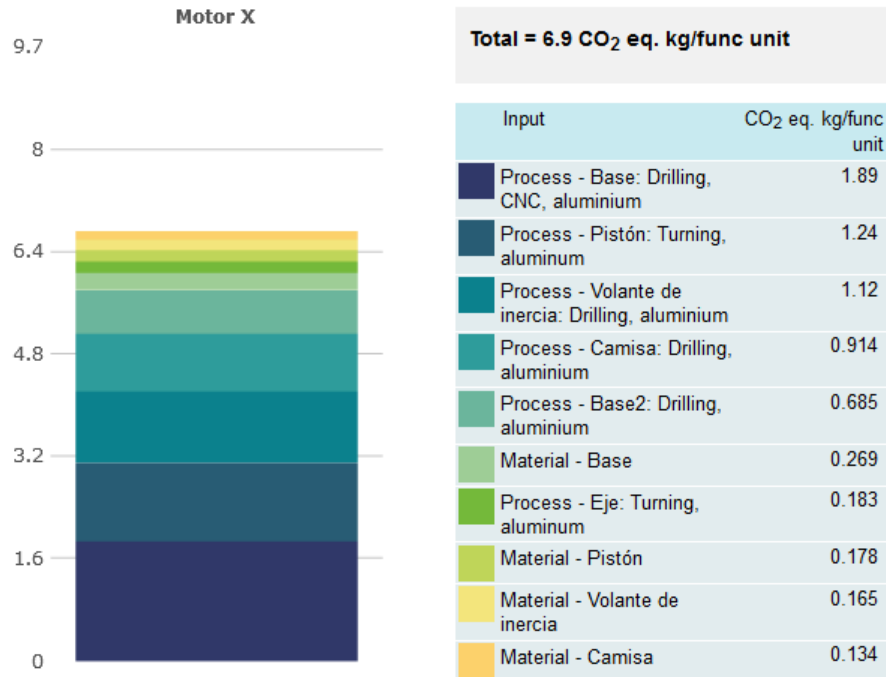


Figura 6.5 Resultados de impacto por componente de motor X (Borja, et al., 2018)

En la figura 6.6 se puede observar los resultados arrojados por el software y la comparación entre el motor x, el motor A y el motor fresado.


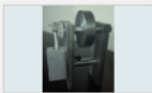

Functional unit: 1 year of use	Impacts / functional unit mPts/func unit	CO ₂ eq. kg / functional unit CO ₂ eq. kg/func unit	Performance improvement from reference mPts	Performance improvement from reference %	Units of svc delivered Svc. Units	Assessment type
Create a new Concept + Reference  Motor X Copy Declare as: Final	1.1	6.9			1	Estimate
 Motor A Copy Delete Declare as: Reference Final	1.3	8.2	-0.19	-17%	1	Estimate
 Motor Fresado Copy Delete Declare as: Reference Final	1.7	11	-0.59	-54%	1	Estimate

Figura 6.6 Cuadro comparativo de resultados de motores X, A y fresado.

Si bien el motor fresado es el peor puntuado entre los tres, se encuentra también considerando el apartado de transporte, que representa el tercer lugar entre las entradas por componentes.

En la figura 6.7 se encuentra la gráfica comparativa entre componentes, donde se muestran los puntajes obtenidos por cada componente. En los tres modelos se observa que el soporte vertical y el volante representan los mayores puntajes.

En el caso del motor A, se hicieron simplificaciones donde los componentes como la manivela y el conector se unen para representar al equivalente de la manivela. El conector pasa a ser el soporte horizontal y las dos bases se toman como el soporte vertical.

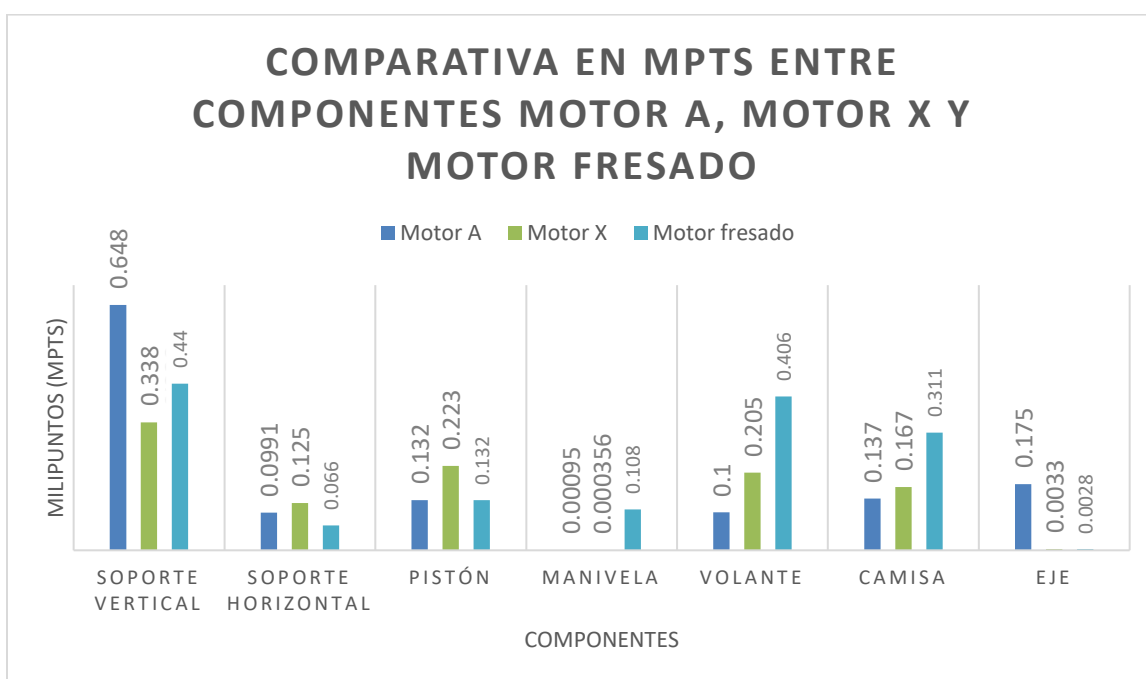


Figura 6.7 Gráfico comparativo entre componentes de motor A, motor X y motor fresado. Un punto representa la carga ambiental correspondiente a cada ciudadano del país, se usan milipuntos debido a lo pequeño que llega a ser el impacto ambiental de un producto comparado con lo correspondiente a un ser humano.

7.- Conclusiones

Se concluye lo siguiente:

- Se cumplió el objetivo satisfactoriamente.
- El uso de maquinado CNC en piezas complejas como la manivela presenta una huella de carbono mayor comparada con el uso de manufactura aditiva.
- Si bien la simplicidad del diseño redujo la cantidad de operaciones de manufactura y mejorando el tiempo de maquinado, se puede ver comprometido el funcionamiento en partes críticas.
- Una parte crítica en el desarrollo del motor fresado fue la sujeción de la pieza de trabajo, que tuvo como consecuencias la modificación en la etapa de generación de trayectorias.
- La sujeción de la pieza y la configuración de la máquina herramienta aumenta el tiempo de uso del equipo, teniendo como consecuencia aumento en el costo de manufactura.

Según los resultados obtenidos, el motor fresado desarrollado presenta mejoras en el tiempo de maquinado respecto al motor A de Corella y Ramírez (2011). El maquinado del motor fresado tiene una duración de 2h38m55s, a comparación del motor A con una duración de 5h5min. La mejora del tiempo se debe principalmente a las trayectorias de corte, puesto que en las seis iteraciones realizadas se mantuvieron los mismos parámetros. Se buscó que las operaciones evitaran movimientos redundantes.

En cuanto a número de piezas fabricadas, el motor fresado tiene 7 piezas fabricadas, comparado contra ellas 9 del motor A y las 8 del motor X. Sin embargo, el uso de componentes comerciales supera a los dos modelos, siendo un total de 21 componentes en el motor fresado, contra los 16 y 12 de los motores A y X respectivamente. Aquí se presenta una oportunidad de mejora en el método de unión, de manera que se use una menor cantidad de tornillos reduciendo la complejidad del ensamble (Okala Practitioner, 2012).

Referente al ensamble, el modelo usa la misma cabeza de tornillo, así como una prensa troqueladora manual para el ensamble de los componentes mediante un ajuste de interferencia.

Referente al funcionamiento, el hecho de no maquinar las superficies puede ocasionar que se pierda el sellado entre la camisa y el soporte vertical, puesto que se ve afectado por el estado en el que se encuentre la solera usada como pieza de trabajo. Se recomienda realizar un desbaste al soporte vertical del lado donde se encuentra la interacción con la camisa.

Los costos del motor fresado son de \$591.50 de material y herramientas. Comparado con el motor X, donde se reporta un costo de \$164.16 MXN por concepto de material y maquinado (Borja, et al., 2018), mientras que el motor A reporta un costo de \$355.00 MXN correspondiente a material y herramientas (Corella & Ramírez, 2011). Si bien la fortaleza del motor fresado radica en el tiempo, se ve mermado en costos debido a la compra de un mayor número de herramientas y materia prima. La reducción de su tamaño puede beneficiar el costo, sin embargo, el uso de cortadores más pequeños aumenta el tiempo de maquinado. Conviene encontrar un equilibrio entre tamaño de cortadores, desperdicio y costo si se realiza completamente en un centro de maquinado CNC.

El estudio energético realizado en el software *Sustainable Minds*® muestra en el apartado de emisiones de dióxido de carbono, el motor fresado se encuentra peor puntuado comparado con el motor X y A. Se observa que la causa principal radica en el uso de maquinado CNC. Tan solo en el soporte vertical del motor fresado, el maquinado en CNC representa el 22% de las emisiones totales de dióxido de carbono del motor. Así mismo, en el análisis por componente, se observa que los tres presentan un puntaje alto de milipuntos en el soporte vertical. El motor fresado muestra altos puntajes en la camisa y el volante, de manera que se comprueba la recomendación antes mencionada, donde la camisa puede mejorarse cambiando su configuración.

Finalmente, la propuesta presentada beneficia a los estudiantes de CAD-CAM, primero en la reducción del tiempo de maquinado, permitiendo su realización en una sola sesión de maquinado. Así mismo, facilita la etapa de manufactura, puesto que después del maquinado, los demás procesos de manufactura son realizados manualmente. Otro beneficio es el costo, si bien es de \$591.50, se divide entre el número de integrantes del equipo, siendo regularmente de tres personas, donde la cantidad aportada por alumno es menor a \$200.00 MXN.

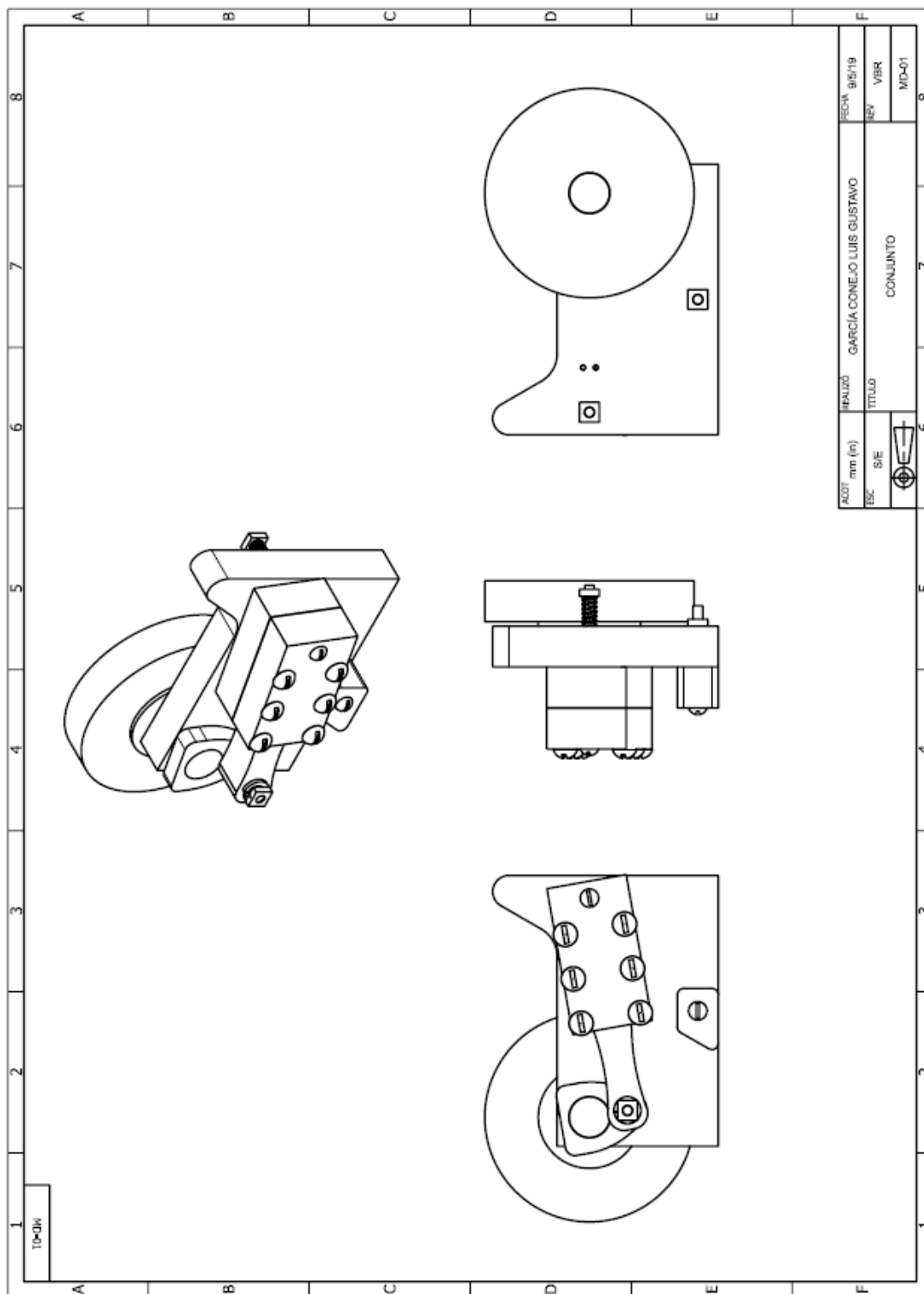
Referencias

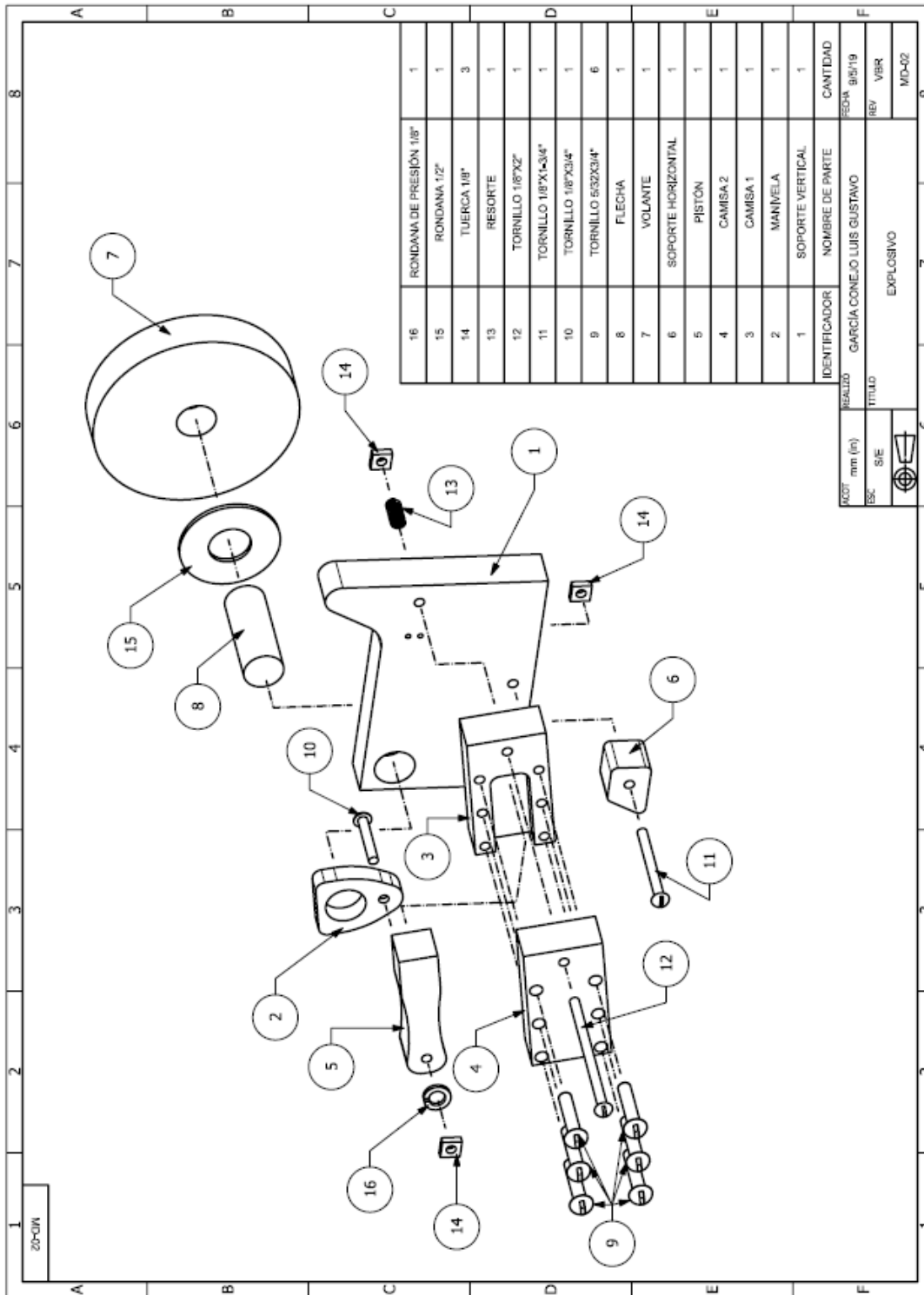
- Alavala, C., 2009. *CAD/CAM: Concepts and Applications*. Primera ed. New Delhi: PHI Learning.
- Autodesk Inc., 2014. *Fundamentals of CNC Machining: Autodesk*. [En línea]
Disponible en: <https://www.autodesk.com/campaigns/cnc-handbook>
[Último acceso: 19 Febrero 2019].
- Borja, V., López, K. & Mendoza, A., 2018. Estudio comparativo de motores de aire didácticos con énfasis en la sustentabilidad. *Memorias del congreso anual de la SOMIM*, pp. 160-168.
- Borja, V. & Ramírez, A., 2006. *Cuadernos de gestión tecnológica. Innovación de producto*. México: Premio Nacional de Tecnología.
- Campos, A., Borja, V. & Ayala, Á., 2017. Comparación de software shareware para generación de programas en código G. *Memorias del XXIII congreso internacional anual de la SOMIM*, Issue 23, pp. 142-144.
- Chang, T.-C., Wysk, R. & Wang, H.-P., 2006. *Computer-Aided Manufacturing*. Tercera ed. New Jersey: Pearson Education Inc..
- Chevalier, A., 2005. *Dibujo Industrial*. Primera ed. México: Limusa.
- Coban Engineering, 2019. *Tolerancias ANSI y ISO*. [En línea]
Disponible en: https://www.cobanengineering.com/Tolerancias/Tolerancias_Definicioness.asp
[Último acceso: 7 Marzo 2019].
- Coordinación de Desarrollo Tecnológico, 2019. *Longitud de estación*. [Online]
Disponible en: <https://metro.cdmx.gob.mx/longitud-de-estacion>
[Accessed 20 Marzo 2019].
- Corella, L. & Ramírez, J., 2011. *Desarrollo de dos proyectos didácticos para la asignatura de Diseño y manufactura asistidos por computadora*. Cd. Universitaria: UNAM.
- FAMA TOOLS, 2008. *FT: Condiciones de corte para cortadores de carburo*. [Online]
Disponible en: <http://www.famatools.com>
[Accessed 4 Marzo 2019].
- Groover, M., 2010. *Fundamentals of Modern Manufacturing*. Cuarta ed. s.l.:Jonh Wiley & Sons.
- Harvey Performance Company, 2017. *Diving Into the Depth of Cut - In The Loupe - Machinist Blog*. [Online]
Disponible en: <https://www.harveyperformance.com/in-the-loupe/depth-of-cut/>
[Accessed 3 Marzo 2019].
- ITESM, 2004. *El método de proyectos como técnica didáctica*. [En línea]
Disponible en: <http://sitios.itesm.mx/va/dide2/documentos/proyectos.PDF>
- Martín, T. & Serrano, A., 2014. *Dinámica de un sólido rígido: momento de inercia*. [Online]
Disponible en: www2.montes.upm.es
[Accessed 14 Febrero 2019].

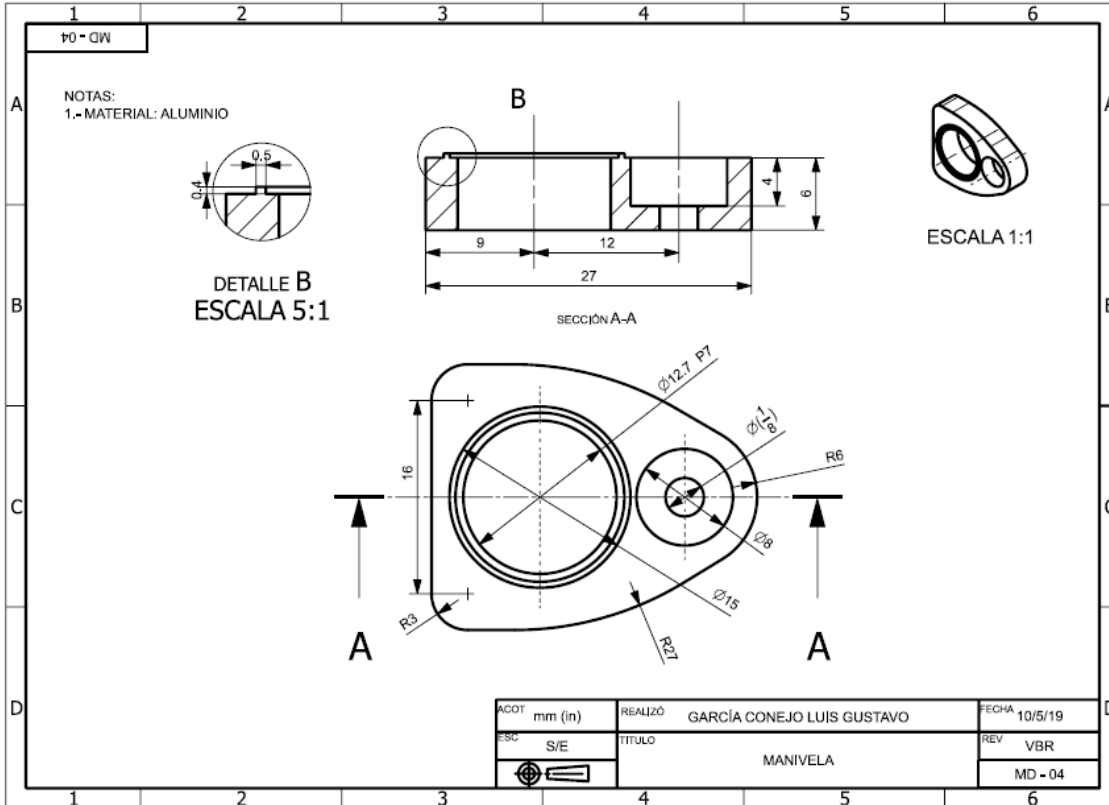
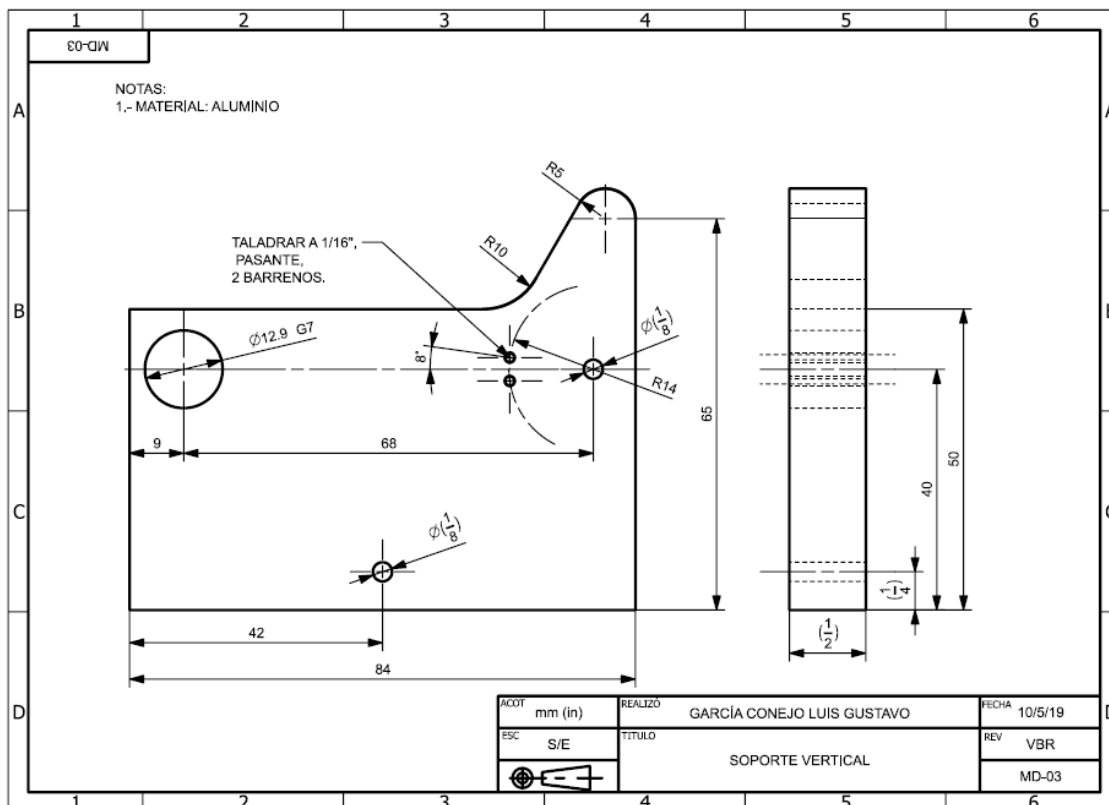
- Meijer, J., 2011. *SM2011 Impact Assesment Methodology*. s.l.:Sustainable Minds.
- Norton, R., 2000. *Diseño de maquinaria*. México: McGraw-Hill.
- Oberg, E., Jones, F., Horton, H. & Ryffel, H., 2012. *Machinery's Handbook*. 29th ed. New York: Industrial Press.
- Okala Practitioner, 2012. *Okala EcoDesign Wheel*. [En línea]
Disponible en: <http://www.okala.net/Okala%20Ecodesign%20Strategy%20Guide%202012.pdf>
[Último acceso: 27 Noviembre 2018].
- Sandvik Coromant, 2019. *Fresado en <<plunge>>*. [En línea]
Disponible en: <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/milling/milling-holes-cavities-pockets/pages/plunge-milling.aspx>
[Último acceso: 17 02 2019].
- Schey, J., 2000. *Procesos de manufactura*. Tercera ed. México: McGraw-Hill.
- Siemens Product Lifecycle Management Software Inc, 2014. *Siemens Documentation: NX 10 Help*. [En línea]
Disponible en: https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/10/nx_help/
[Último acceso: 10 Febrero 2019].
- Sustainable Minds, 2019. *Sustainable Minds*. [En línea]
Disponible en: <https://app.sustainableminds.com/homepage>
[Último acceso: 15 Febrero 2019].
- Touger, J., 2006. *Introductory Physics, Building Understanding*. Primera ed. s.l.:Wiley.
- Ulrich, K. & Eppinger, S., 2013. *Diseño y desarrollo de productos*. México: McGraw-Hill.
- UNAM, 1988. *Prácticas del laboratorio de máquinas térmicas*. Facultad de Ingeniería: s.n.
- UNAM, 2010. *Diseño y Manufactura Asistidos por Computadora*. Facultad de Ingeniería: UNAM.
- Vezzoli, C. & Manzini, E., 2015. *Diseño de productos ambientalmente sustentables*. México: Designio.
- WCED, 1987. *Our Common Future*. Oxford: Oxford University Press.
- Zeid, I., 1991. *CAD/CAM Theory and Practice*. Singapore: McGraw-Hill.

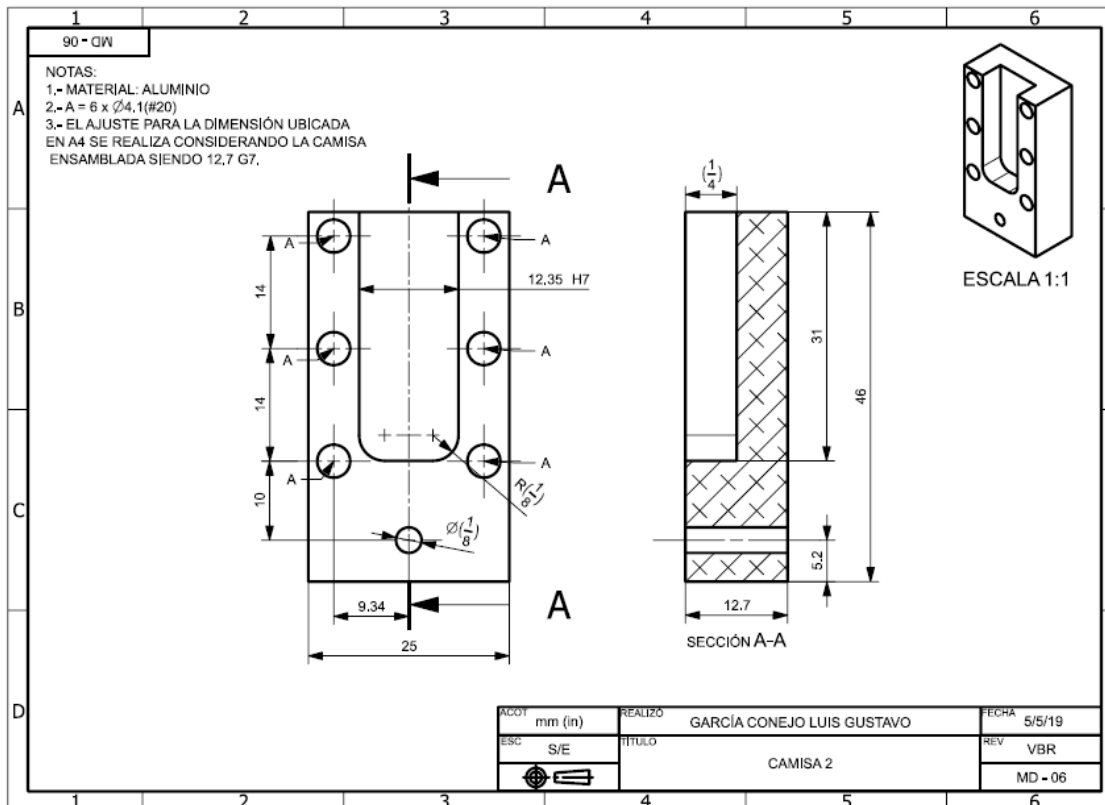
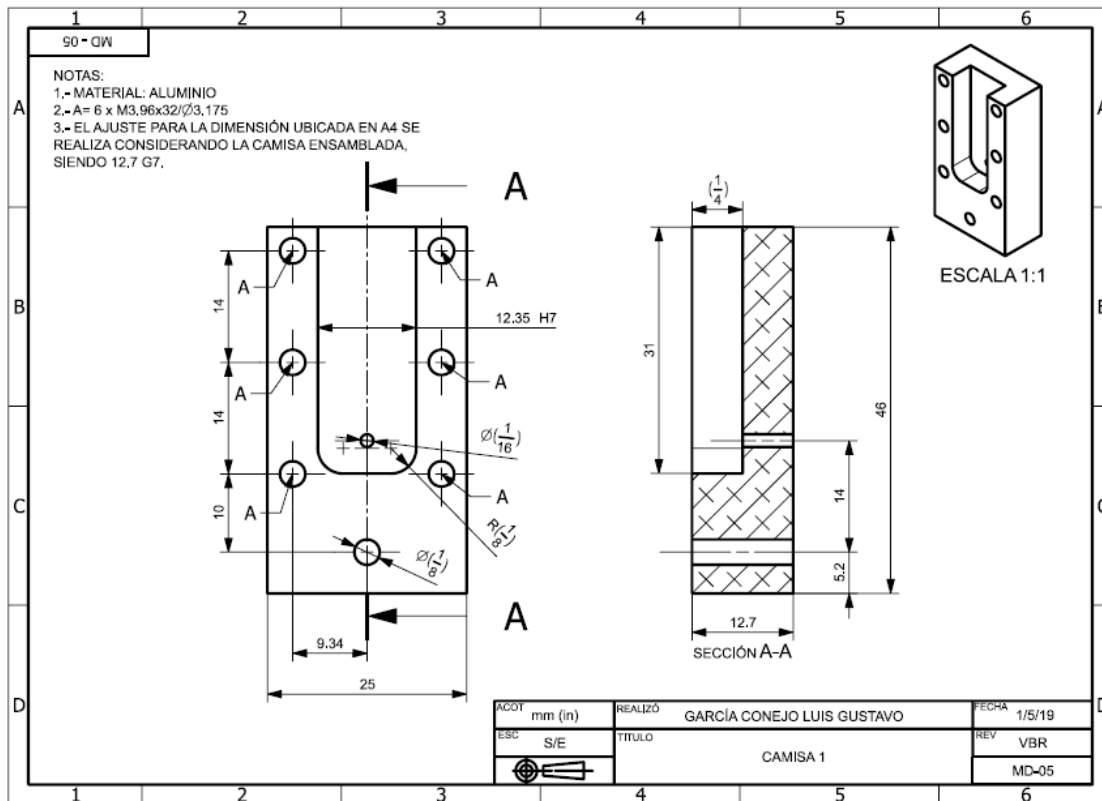
Anexos

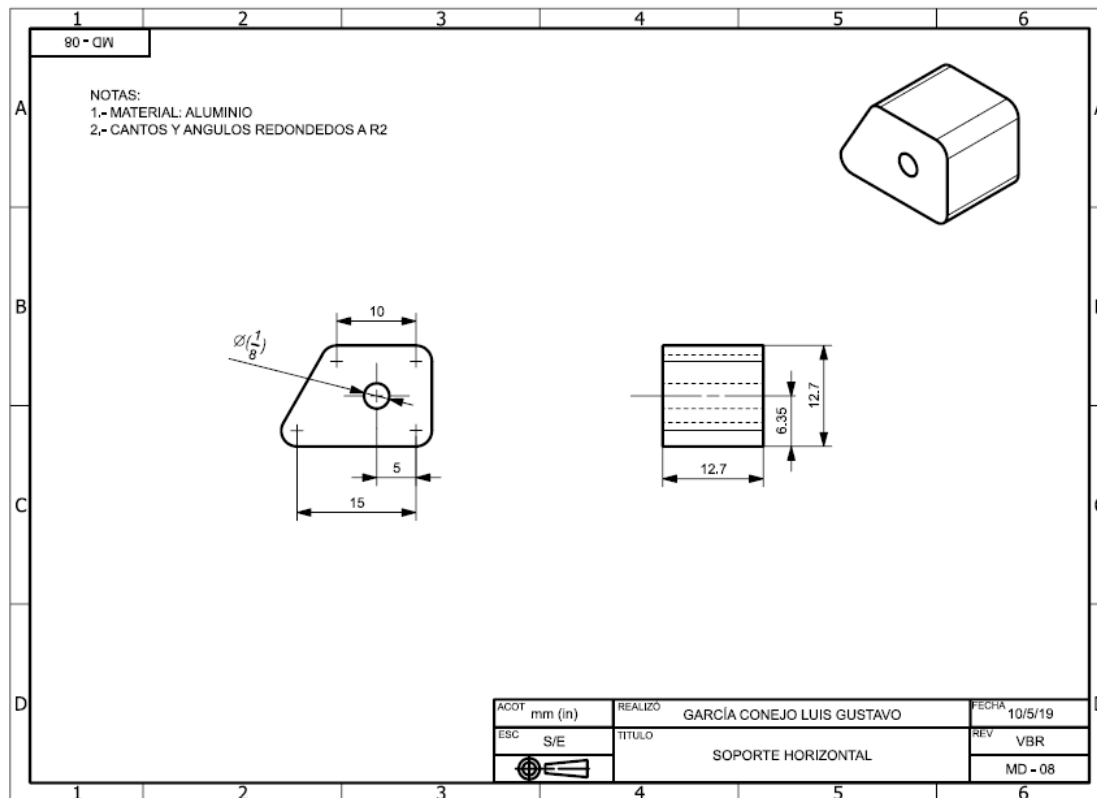
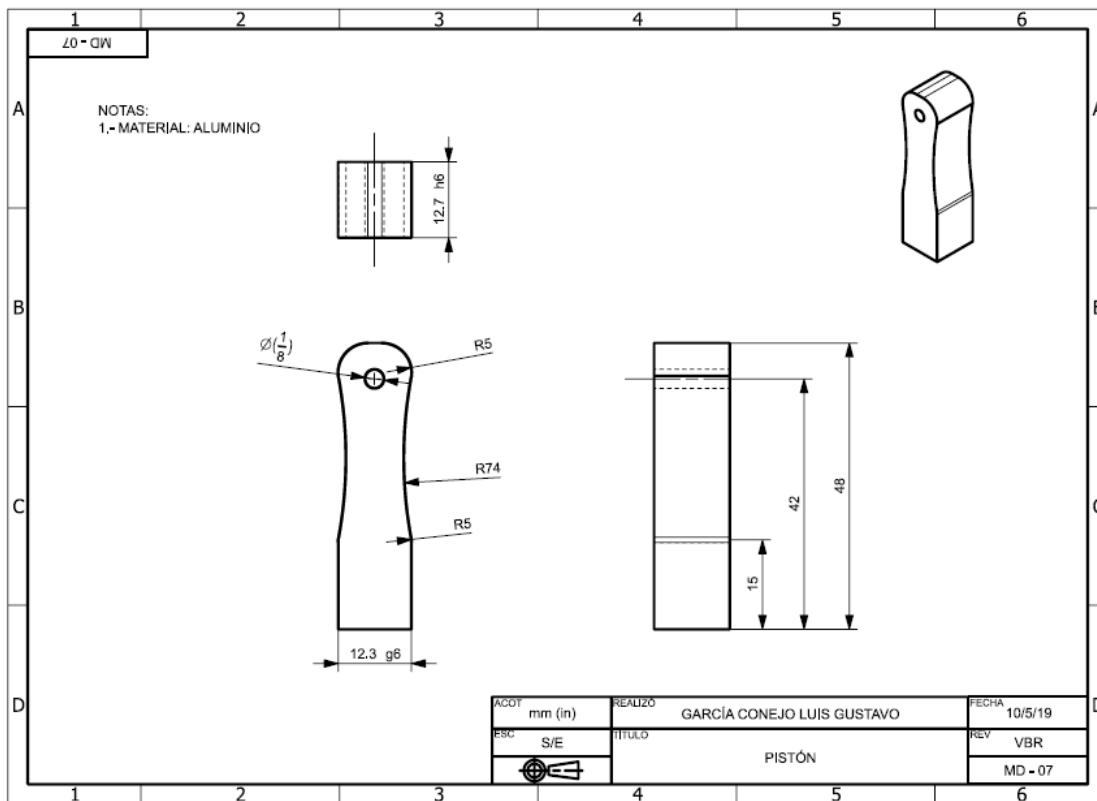
Anexo A.- Planos

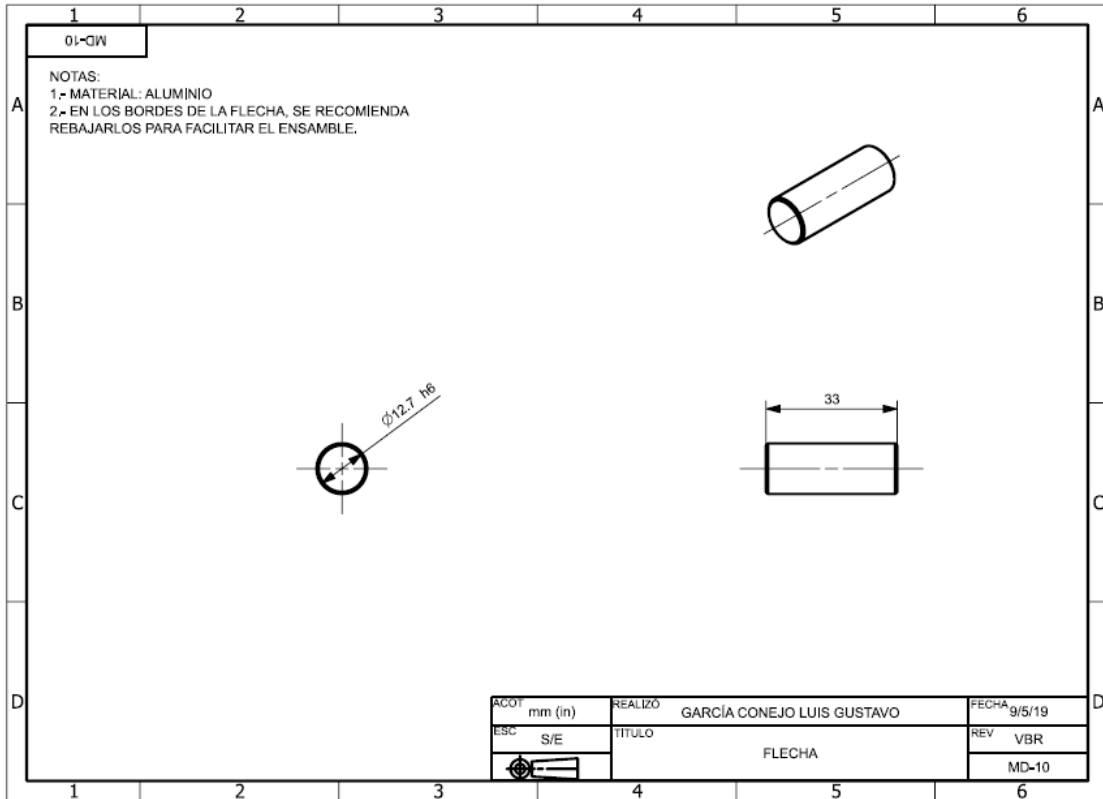
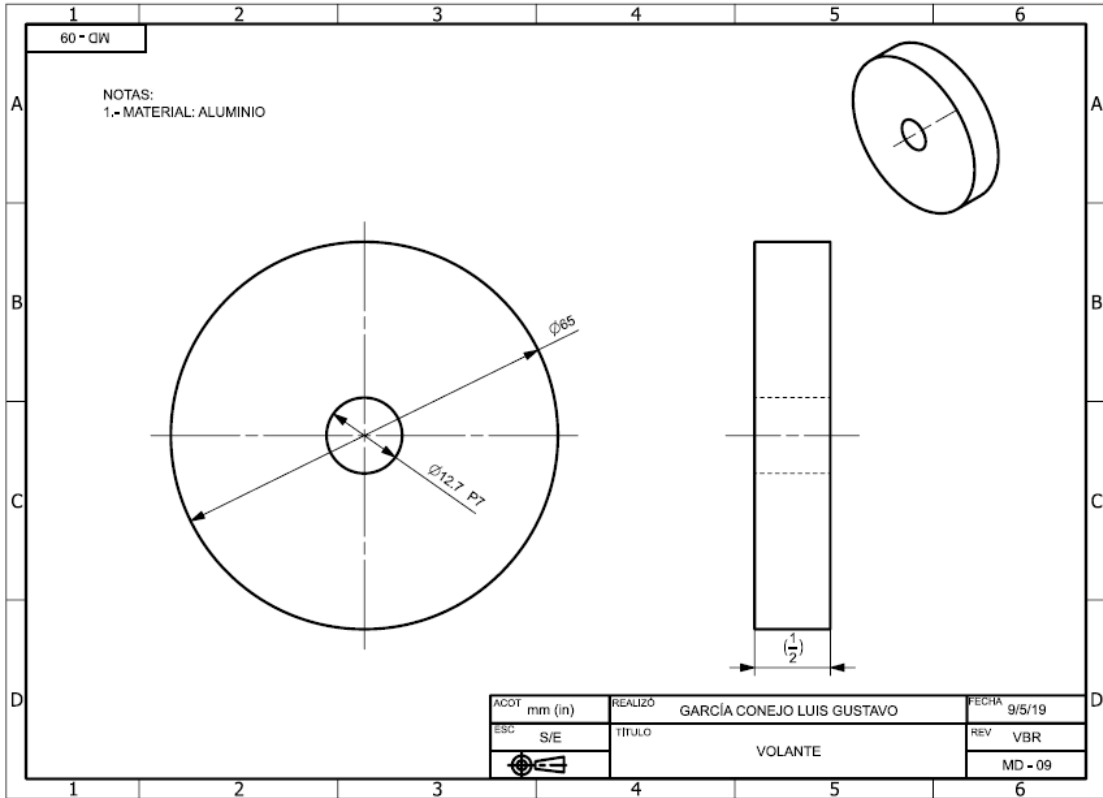




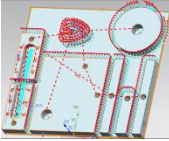
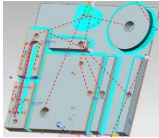
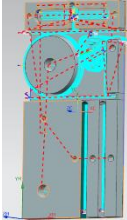
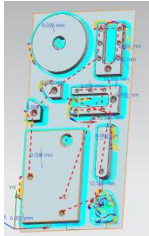
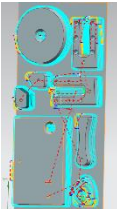
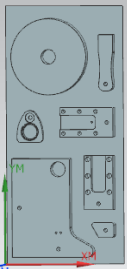








Anexo B.- Cuadro de características de generación de trayectorias

Modelo	Imagen	Número de operaciones	Número de herramientas	Número de Piezas	Tiempo de manufactura simulación	Tamaño de código (caracteres)	Número de líneas	Tamaño de código (KB)
MD1		14	5	8	02:22:08	29,073 (25,801)	2108	33
MD2		13	5	8	01:24:11	36,230 (32,032)	1436	39
MD3		12	5	8	01:01:14	30,658 (27,179)	1348	33
MD4		25	5	8	01:47:29	48,607 (42,679)	1396	51.5
MD5		17	4	8	02:05:27	75,217 (66,329)	2921	80
MD6		23	4	7	02:00:51	55,197 (48,600)	2121	59

Anexo C.- Cuadros descriptivos de etapa de manufactura

Componente	Volumen materia prima y partes individuales (m ³)	Masa (kg)	Operaciones de remoción:	Masa materia prima (g)	Tiempo (s)	Masa material removido (g)
Solera Base	283.87x10 ⁻⁶	0.76645	-	766.45	-	-
Solera sacrificio	77.42x10 ⁻⁶	0.209032	-	209.03	-	-
Eje	4.054x10 ⁻⁶		-	10.94	-	-
Soporte vertical	54.89x10 ⁻⁶	0.1488	-Barreno de 12.8 mm -dos de punta para 1/16 pasados -dos de 1/8	230.25	1656.56	Contorno=25 Barreno 12.8=4.3437 Barrenos 116=0.136 Barrenos 18=0.543 TOTAL=30.0227
Soporte horizontal	2.55x10 ⁻⁶	0.0069	-barreno de 1/8	34.95	425	Contorno=6.7363 Barreno118=0.271 TOTAL=7
manivela	1.93x10 ⁻⁶	0.005241	-desbaste cara -barreno 1/8 -barreno cuna	56.6	837	Desbaste cara=26.23 Contorno= 6.04 Barrenos=2.563 Barreno118=0.043 TOTAL=34.88
pistón	6.664x10 ⁻⁶	0.018	-Barreno de 1/8 En perfil, se usa 1/4	69.14	432	Contorno=15.68 Barreno 118=0.271 TOTAL=16
Camisa 1	11.478x10 ⁻⁶	0.0311	-7 barrenos 1/8 -uno de centros para 1/16 -cavidad de pistón	81.54	1222	Contorno=14.7 Cavidad pistón=6.51 Barrenos(7)= 1.9 Barreno 1/16=0.03 TOTAL=23.14
Camisa 2	11.088x10 ⁻⁶	0.03	-1 de 1/8 -6 de centros para broca #20 -cavidad de pistón	81.54	1227.6	Contorno=14.7 Cavidad pistón=6.51 Barreno 118=0.271 Barreno #20(6)=2.7 TOTAL=21.48
Volante de inercia	40.583x10 ⁻⁶	0.110023	Barreno de 12.5	212.43	1424	-Contorno=21.53 -Barreno=4.2 TOTAL= 25.83