

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

“Diseño de una bomba para sistemas de enfriamiento líquido de
microprocesadores”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Echeverría Veas Samir Alexander

Torres Mazon Carlos Fernando

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

El presente proyecto está dedicado para nuestros familiares, amigos y tutores que quienes nos ofrecieron su ayuda para hacer posible este proyecto.

AGRADECIMIENTO

Nuestros más sinceros agradecimientos a todas las personas que aportaron de forma directa o indirecta al desarrollo del proyecto.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Samir Alexander Echeverría Veas* y *Carlos Fernando Torres Mazon* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

Samir Echeverría

Samir Alexander
Echeverría Veas

Carlos Torres M

Carlos Fernando
Torres Mazon

EVALUADORES



Firmado electrónicamente por:
**ANDREA JAEL
BOERO VERA**

M.Sc. Andrea Boero Vera

PROFESOR DE LA MATERIA

**GALO ANDRES
DURAZNO
PALACIOS** Firmado digitalmente
por GALO ANDRES
DURAZNO PALACIOS
Fecha: 2021.09.30
08:45:20 -05'00'

M.Sc. Galo Durazno Palacios

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Los microprocesadores han aumentado su capacidad de procesar y transferir información siendo componentes más eficientes con el paso del tiempo. Sin embargo, requieren mayor cantidad de energía generando más calor, el cual difícilmente es removido por convección natural. El presente trabajo tiene como objetivo principal el de diseñar una bomba para sistemas de enfriamiento líquido de microprocesadores, analizando el comportamiento del fluido y proponiendo ciclos de fabricación para sus elementos. El proyecto busca impulsar la matriz productiva del país debido a que en Ecuador no se fabrican este tipo de bombas. Se emplearon software de diseño y simulación como CF turbo, Inventor y ANSYS para dimensionar y diseñar el impulsor y la voluta acorde a los requerimientos del cliente. Asimismo, se plantearon los elementos a los cuales se les realizará un ciclo de fabricación con sus respectivas condiciones que se deberían de tener en cuenta al momento de la selección del proceso de manufactura. Se realizaron varios modelos de bombas cambiando el diámetro de salida y el ángulo de salida del impulsor de 23° a 27° con la finalidad de obtener las dimensiones apropiadas que permitan cumplir con el cabezal requerido. Además, se obtuvo el costo de fabricación y la manufactura a aplicar a cada pieza. Se concluyó que el diseño tiene potencial comercial debido a la nula producción de estas bombas y a la facilidad de encontrar tecnologías de impresión 3D MJ y de mecanizado CNC a nivel nacional teniendo un costo de fabricación de \$150.83.

Palabras Clave: Sistemas de enfriamiento líquido, Bombas centrífugas, ANSYS, Ciclo de fabricación, Impulsor.

ABSTRACT

Microprocessor has increased its capacity to process and transfer data, becoming more efficient components over time. However, microprocessors require amounts of energy that produce higher heat generation which is hardly removed using natural convection. This work has as main objective to design a pump for liquid cooling system of microprocessors, analyzing the fluid behavior and proposing manufacturing cycles for their elements. This project seeks to impulse the productive matrix of the country since in Ecuador these types of pumps are not manufactured. Simulation programs such as: ANSYS, CF turbo and Inventor were used to design and to dimension the impeller and volute according with the customer requirements. As well, the elements which will be performed a manufacturing cycle were planted with their respective conditions to consider when selecting the manufacturing process. Several models of pumps were made changing the outlet diameter and outlet angle of the impeller from 23° a 27° to obtain appropriate dimensions that allow to comply with the required head. Furthermore, the manufacturing and its cost were obtained for each element designed. It was concluded that the design has commercial potential since in Ecuador these types of pumps are not manufactured and technologies such as printer 3D MJ and CNC machining are easy to find, getting a manufacturing cost of \$150.83.

Keywords: *Liquid cooling systems, centrifugal pumps, ANSYS, Manufacturing cycle, Impeller.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
ÍNDICE DE PLANOS.....	IX
CAPÍTULO 1.....	1
1 Introducción	1
1.1 Definición del Problema.....	1
1.2 Justificación del proyecto.....	1
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
1.4 Marco teórico.....	2
1.4.1 Sistemas de enfriamiento líquido.....	3
1.4.2 Bombas.....	4
1.4.3 Procesos de manufactura.....	8
CAPÍTULO 2.....	10
2 Metodología	10
2.1 Parámetros de diseño	11
2.1.1 Requerimientos de diseño del cliente.....	11
2.1.2 Especificaciones de diseño.....	12
2.2 Diseño de forma.....	12

2.2.1	Alternativas.....	12
2.3	Diseño detallado.....	17
2.3.1	Dimensionamiento inicial.....	17
2.3.2	Cálculos teóricos.....	18
2.4	Validación del diseño.....	24
2.4.1	Simulaciones.....	24
2.5	Registro de datos.....	26
2.6	Ciclo de manufactura.....	27
CAPÍTULO 3.....		28
3	Resultados y análisis	28
3.1	Resultados de simulaciones.....	28
3.1.1	Punto de máxima eficiencia según geometría de la bomba.....	29
3.2	Resultados teóricos.....	32
3.2.1	Curvas H y η_b Vs. Q del diseño final.....	33
3.3	Selección de componentes adicionales.....	34
3.4	Solución propuesta.....	35
3.5	Procesos de manufactura.....	36
3.6	Análisis de costos.....	37
CAPÍTULO 4.....		39
4	Conclusiones y recomendaciones	39
4.1	Conclusiones.....	39
4.2	Recomendaciones.....	40
BIBLIOGRAFÍA		
APÉNDICES		

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica de Litoral
CPU	Central Processing Unit
GPU	Graphics Processing Unit
CFD	Computational Fluids Dynamics
CAD	Computer Assisted Design
RPM	Revoluciones por minuto
API	American Petroleum Institute
ANSI	American National Standards Institute
ISO	International Standards Organization
DIN	Deutsches Institut für Normung
MJ	Material Jetting
FDM	Fused Deposition Modelling

SIMBOLOGÍA

mca	Metro de cabezal de agua
L	Litro
hr	hora
m	Metro
mm	Milímetro
V	Voltio
W	Vatio
s	Segundo
Pa	Pascal
°	Grado
rad	Radián

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Metodología empleada.	10
Figura 2.2 Caja negra.	11
Figura 2.3 Caja transparente.	11
Figura 2.4 Diseño de forma.	16
Figura 2.5 Perfil del impulsor y de la voluta dimensionado en CF Turbo.	18
Figura 2.6 Modelo CFD obtenido mediante CF Turbo.	25
Figura 2.7 Modelo CFD modificado en Inventor.	25
Figura 3.1 Modelo CFD visto desde el Setup.	28
Figura 3.2 Eficiencia en función del ángulo con 36 mm de diámetro.	29
Figura 3.3 Eficiencia en función del ángulo con 37 mm de diámetro.	31
Figura 3.4 contorno de velocidad.	31
Figura 3.5 Contorno de presión.	32
Figura 3.6 Cabezal y flujo volumétrico teórico a 36 mm de diámetro.	32
Figura 3.7 Cabezal y flujo volumétrico teórico a 37 mm de diámetro.	33
Figura 3.8 Curvas de la bomba.	34
Figura 3.9 (a) vista del impulsor (b) vista explotada (c) vista del ensamble.	36
Figura A.1 Esquema de trabajo en ANSYS Fluent.	45
Figura A.2 Detalles del mallado realizado en la herramienta Mesh.	45
Figura A.3 Detalles del mallado (continuación).	46
Figura A.4 Detalles del mallado (Final).	47
Figura A.5 (a) vista frontal (b) vista con aumento al mallado (c) vista posterior.	47
Figura A.6 Calidad gráfica del mallado.	48
Figura A.7 Calidad del mallado después de mejorarla en el setup.	48
Figura A.8 Espectro de calidad del mallado.	48
Figura A.9 Cabezal de (a) 3.4 (b) 2.5 (c) 2.0 (d) 0.5 (e) 0 [m].	49
Figura A.10 Flujos volumétricos de (a) 44 (b) 292 (c) 500 (d) 731 (e) 798 [L/hr].	50
Figura A.11 Líneas de flujo.	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Normas más empleadas para fabricar bombas centrífugas.....	8
Tabla 2.1 Especificaciones de diseño.	12
Tabla 2.2 Comparación de los criterios de diseño.....	14
Tabla 2.3 Tipos de puertos en la entrada y salida.	15
Tabla 2.4 Número de puertos de entrada y salida.....	15
Tabla 2.5 Tipo de carcasa.	16
Tabla 2.6 Dimensiones del impulsor.....	17
Tabla 2.7 Dimensiones de la voluta.....	18
Tabla 2.8 Características del mallado.	26
Tabla 2.9 Condiciones de simulación.	26
Tabla 2.10 Consideraciones de manufactura de los elementos.	27
Tabla 3.1 Resultados con diámetro exterior de 36 mm a diferentes ángulos.	29
Tabla 3.2 Resultados con diámetro exterior de 37 mm a diferentes ángulos.	30
Tabla 3.3 H, Q, η_b , P_H , P	34
Tabla 3.4 Componentes adicionales.	35
Tabla 3.5 Resultados del proceso de fabricación de cada componente.....	37
Tabla 3.6 Costos generales del diseño de la bomba.....	38
Tabla C.1 Ciclo de fabricación de la carcasa.....	62
Tabla C.2 Ciclo de fabricación de la base	63
Tabla C.3 Ciclo de fabricación de la carcasa-voluta.....	64
Tabla C.4 Tabla del proceso de fabricación	65

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1	Lista de Piezas
PLANO 2	Carcasa-Voluta
PLANO 3	Carcasa
PLANO 4	Base
PLANO 5	Impulsor

CAPÍTULO 1

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Definición del Problema

El desarrollo de procesadores de mayor potencia utilizados en las unidades de procesamiento central (CPU) y tarjetas gráficas (GPU) de ordenadores destinados a ejecutar aplicaciones exigentes, programas de simulación, dibujo e inclusive videojuegos, implica la creación de nuevos sistemas que requieren de una mayor cantidad de energía para funcionar, en donde parte de esta energía se desperdicia en forma de calor, el cual necesita disiparse para que los componentes operen dentro de un rango de temperatura adecuado. En la actualidad, los sistemas de ventilación son ampliamente utilizados para solventar esta necesidad, sin embargo, estos suelen ser poco eficientes, ocupan gran espacio y generan ruido. Disponer de sistemas de enfriamiento más eficientes permitiría optimizar los procesos de transferencia de calor en los componentes de los ordenadores y en consecuencia mejorar su desempeño. Por este motivo, la empresa FLUIX LLC dedicada a diseñar y fabricar componentes de sistemas de enfriamiento líquido para PC, solicitó anteriormente el diseño de un bloque de enfriamiento líquido para GeForce GTX 1650 basado en dinámica de fluidos computacional, en el cual se lograron obtener excelentes resultados en cuanto a su función de disipar calor (Arnés & Herrera, 2020). Actualmente requiere el diseño de otro componente importante de este tipo de sistemas para continuar solventando la necesidad de disipación de calor de los procesadores.

1.2 Justificación del proyecto

El correcto manejo y control de temperatura de componentes electrónicos, como los que constituyen al ordenador, entre esos las unidades de procesamiento central (CPU) y procesamiento gráfico (GPU), extiende su tiempo de vida útil además de preservar su rendimiento y eficiencia. Actualmente, en Ecuador no se fabrican bombas para sistemas de enfriamiento líquido de microprocesadores, donde los conocimientos de

ingeniería mecánica son altamente aplicados. Por lo tanto, se incentiva al desarrollo de estos elementos con la intención de incursionar en el campo de la tecnología computacional, apoyando la transformación de la matriz productiva del país.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar una bomba para sistemas de enfriamiento líquido de microprocesadores.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Diseñar una bomba que se adapte a los requerimientos de operación de los sistemas de enfriamiento líquido para microprocesadores que existen en el mercado.
2. Analizar el comportamiento del fluido para determinar una geometría adecuada para el impulsor y voluta de la bomba.
3. Analizar las diferentes tecnologías para la fabricación de los elementos de la bomba diseñada.
4. Desarrollar el ciclo de fabricación de los diferentes elementos.

1.4 Marco teórico

La evolución tecnológica referente a la informática ha avanzado de forma significativa en los últimos años, por lo que es necesario componentes con mayor eficiencia para transferir datos y con menor tamaño. De acuerdo con la ley de Moore, el número de transistores se duplica cada dos años, incrementando consigo la densidad de potencia que consumen los dispositivos electrónicos y la cantidad de calor que generan. De modo que, tanto el procesador del computador como los diferentes componentes

necesitan transferir calor para mantenerse bajo una temperatura límite que usualmente es por debajo de los 100°C. Enfriar los componentes de un ordenador es de vital importancia para mantener un óptimo rendimiento (Nath, 2021). Se estima que el calor disipado por una unidad de CPU de escritorio está entre 80 y 130 W, en una laptop entre 25 y 50 W con un área de disipación de calor de los chips entre 1-4 cm² (Masataka et al., 2005). Por este motivo, se han implementado varios métodos de refrigeración para los diferentes componentes destacándose los de tipo activo y pasivo.

La refrigeración pasiva funciona mediante disipadores y láminas metálicas que extienden la superficie de los componentes, mejorando la transferencia de calor con el aire del ambiente. Sin embargo, este método no es muy recomendado, por lo cual, se utilizan ventiladores para renovar el aire que circula por los componentes, utilizándose refrigeración activa. La principal diferencia entre estos métodos de refrigeración radica en el uso de motores para extraer el calor de forma mecánica. Además, se han desarrollado otras tecnologías de refrigeración activa como lo es el enfriamiento líquido (Liang et al., 2019).

Los procesos de refrigeración activa resultan ser más eficientes que los de refrigeración pasiva debido a que aprovechan el movimiento del fluido sobre los componentes electrónicos para generar convección forzada, con la finalidad de aumentar la tasa de disipación de calor. Sin embargo, estos resultan ser más ruidosos y en muchos casos más costosos porque requieren la implementación de sistemas de bombeo.

1.4.1 Sistemas de enfriamiento líquido

Los sistemas de enfriamiento líquido aprovechan la gran capacidad que tienen los líquidos para disipar calor en elementos como microprocesadores, tarjetas gráfica y demás componentes. Además, otra de las ventajas que presenta es que genera menos ruido al compararlos con los sistemas de ventilación. Por otro lado, estos tipos de sistemas están constituidos por componentes como una bomba, radiador, tubos y

líquido. La bomba mantiene el flujo del líquido constante, el radiador enfría el agua que ha absorbido calor de los dispositivos, los tubos interconectan el camino del fluido, y el líquido que fluye por el sistema el cual habitualmente es un anticongelante diluido en agua destilada. Finalmente, estos sistemas constan de aislamientos como espumas o almohadillas con la finalidad de prevenir daños debido a la condensación del vapor de agua (Gallego & Folgado, 2011).

El calor almacenado en este tipo de sistema se disipa al bombear el fluido refrigerante por las tuberías que se conectan con un disipador metálico que va montado sobre los microprocesadores, en donde el calor removido luego es evacuado por un radiador.

Además, los sistemas de enfriamiento líquido se pueden dar de forma directa e indirecta. Uno de ellos es el enfriamiento líquido directo y el otro se lo conoce como enfriamiento líquido por inmersión. En el enfriamiento líquido directo, se hace uso de dispositivos como placas y rieles fríos que se adhieren a la alta densidad de calor generada por los dispositivos electrónicos. Estos dispositivos se conectan directamente mientras el líquido fluye para extraer el calor. Por otro lado, en el enfriamiento líquido por inmersión la totalidad o la mayor parte de los dispositivos se sumergen en el líquido. En ambos procesos se suelen utilizar líquidos/refrigerantes monofásicos o bifásicos (cambio de fase) (Gao et al., 2018).

1.4.2 Bombas

Una bomba es un dispositivo que transfiere energía a un fluido con el propósito de levantarlo, transportarlo o comprimirlo (Lobanoff & Ross, 1992).

En los sistemas de enfriamiento líquido, la bomba se utiliza para hacer circular el fluido a través de todos los componentes en un circuito cerrado. Las bombas centrífugas DDC y D5 son las más utilizadas en este tipo de sistemas y ambas emplean un motor esférico sin eje y tecnología de imán

permanente. Las bombas centrífugas, también denominadas bombas rotodinámicas son las más utilizadas de los tipos de bombas, estas aumentan la presión del fluido a través de la conversión de energía de velocidad (impartida por el motor) en energía de presión.

1.4.2.1 Tipos de bombas centrífugas

Las bombas centrífugas se pueden clasificar de varias formas. Según (Girdhar & Moniz, 2005), algunos de los principales tipos se basan en las siguientes características:

1.4.2.1.1 Dirección del flujo

Se refiere a la dirección del flujo a la salida del impulsor con respecto al eje de la bomba. Pueden ser de flujo radial, axial y mixto. En una bomba de flujo radial, el fluido ingresa a la bomba a través del ojo del impulsor, el cual gira a alta velocidad, luego el fluido es acelerado radialmente hacia afuera desde la carcasa y se crea un vacío parcial que atrae continuamente más fluido hacia la bomba. En las bombas centrífugas de flujo axial, el rotor es una hélice. El fluido fluye paralelo al eje. En las bombas de flujo mixto, la dirección del fluido del impulsor es intermedio entre las bombas de flujo radial y axial.

1.4.2.1.2 Orientación del eje de la bomba

Hace referencia al plano en cual está situado el eje de la bomba. Puede ser horizontal o vertical.

1.4.2.1.3 Número de etapas

Se refiere al número de impulsores que tiene una bomba, es decir, una etapa está conformada por un impulsor. Puede ser única, doble o de múltiples etapas (tiene más de dos).

1.4.2.1.4 Orientación de la boca de succión

Como su nombre lo indica, hace referencia a la orientación de la boca de succión de la bomba.

Puede ser horizontal (conocida como End) o vertical (conocida como Top).

1.4.2.1.5 División de la carcasa

Esta clasificación se basa como la carcasa se divide o se separa. Puede ser radial (perpendicular al eje del eje) o axial (plano del eje del eje).

1.4.2.1.6 Soporte de los cojinetes

En esta clasificación, el tipo de bomba está determinado por la ubicación de los cojinetes que sostienen el rotor. Cuando el rotor está apoyado en forma de voladizo, se denomina bomba “en voladizo” y cuando los impulsores del rotor están apoyados con cojinetes a cada lado, se denomina bomba “entre cojinetes”.

1.4.2.1.7 Soporte de la bomba

Esta clasificación hace referencia a la configuración de los soportes de montaje de la bomba. Puede ser un soporte de “línea central” o un soporte de “pie”.

1.4.2.1.8 Conexión con el eje del motor y eje de succión y descarga

Las bombas de acoplamiento cerrado se caracterizan por la ausencia de un acoplamiento entre el motor y la bomba. El eje del motor posee una longitud extendida, lo cual permite que el impulsor se pueda montar directamente en un extremo.

Las bombas verticales monobloque poseen las bridas de succión y descarga a lo largo de un mismo eje, permitiendo que se pueden montar entre tuberías. Por este motivo, también se conocen como "bombas en línea".

1.4.2.1.9 Bombas sin sello

Las bombas se utilizan para aumentar la presión del fluido contenido

en el interior de la carcasa. El trabajo de contención del fluido es realizado por los sellos mecánicos, los cuales se instalan en la interfaz del eje giratorio y la carcasa. No obstante, los sellos mecánicos son propensos a tener fugas lo que resulta inaceptable en ciertas aplicaciones críticas como el bombeo de químicos orgánicos volátiles y sustancias explosivas.

Para solucionar este problema, se han diseñado y fabricado bombas sin sello mecánico. Estas bombas pueden ser: bombas enlatadas y de impulsión magnética.

1. Bombas enlatadas: En este tipo de bomba sin sello, el rotor está compuesto por un impulsor, un eje y el rotor del motor. Todos estos elementos y el fluido peligroso/tóxico se encuentran alojados dentro de una carcasa de contención y de la carcasa de la bomba. El rotor e impulsor giran debido al flujo giratorio generado por el estator del motor, el cual es capaz de pasar a través de la carcasa de contención.
2. Bombas de transmisión magnética: En este tipo de bombas, el rotor se compone de un impulsor, un eje e imanes accionados. Estos elementos se alojan dentro de la carcasa de la bomba y el líquido peligroso/tóxico se encuentra dentro de la carcasa de contención de metal. El giro del rotor es provocado por el impulso otorgado por los imanes impulsores giratorios a los imanes impulsados. Los imanes impulsores están acoplados al motor primario.

1.4.2.2 Normas de bombas centrífugas

Para lograr estándares mínimos de diseño, uniformidad y especificaciones dimensionales en las bombas centrífugas, varias organizaciones internacionales han desarrollado normas, entre las principales se encuentran API, ANSI, ISO, DIN.

En la Tabla 1.1 se presentan algunas de las normas más empleadas para el desarrollo y fabricación de bombas centrífugas según (Girdhar & Moniz, 2005).

Tabla 1.1 Normas más empleadas para fabricar bombas centrífugas.

Norma
API 610
ANSI B73.1
ISO 5199
ISO 2858
DIN 24256

1.4.3 Procesos de manufactura

El ciclo o proceso de manufactura es un conjunto de pasos o tareas que deben ejecutarse para transformar o convertir las materias primas en productos manufacturados capaces de ser comercializados. En esta se cambian diferentes aspectos de la materia, tanto su forma geométrica como sus propiedades mecánicas, las cuales dependen de la finalidad del producto.

Existen diferentes métodos o tecnologías de manufactura para fabricar piezas, categorizándose entre manufactura convencional y manufactura aditiva. En los procesos convencionales de construcción y manufactura, los moldes, matrices y encofrados restringen la geometría del objeto debido a las limitaciones impuestas en el diseño de estas (Bartle, 2016). Por otro lado, la manufactura aditiva consiste en fabricar piezas previamente modelados capa por capa hasta obtener el objeto con todo su volumen en 3D. De modo que, este método posee la facultad de disminuir costos de producción y tiempo, además de mejorar la eficiencia energética al ser comparada con los procesos convencionales debido a que elimina múltiples pasos en los procesos de formado de los objetos, reduce el

número de partes necesarias para producir un objeto y usa solo el volumen del material que conforma al objeto (Christoph et al., 2017).

En líneas generales, los métodos de manufactura convencionales son los más comunes para fabricar los diferentes componentes de las bombas, utilizando moldes y como material fundente aluminio o cobre. Por otro lado, los procesos de fabricación utilizando manufactura aditiva también son empleados para fabricar los componentes principales de una bomba como el impeler y la voluta como se muestra en (Adiaconitei et al., 2021)

CAPÍTULO 2

2 METODOLOGÍA

La metodología aplicada para el diseño de la bomba para sistemas de enfriamiento líquido de microprocesadores se presenta en la Figura 2.1.

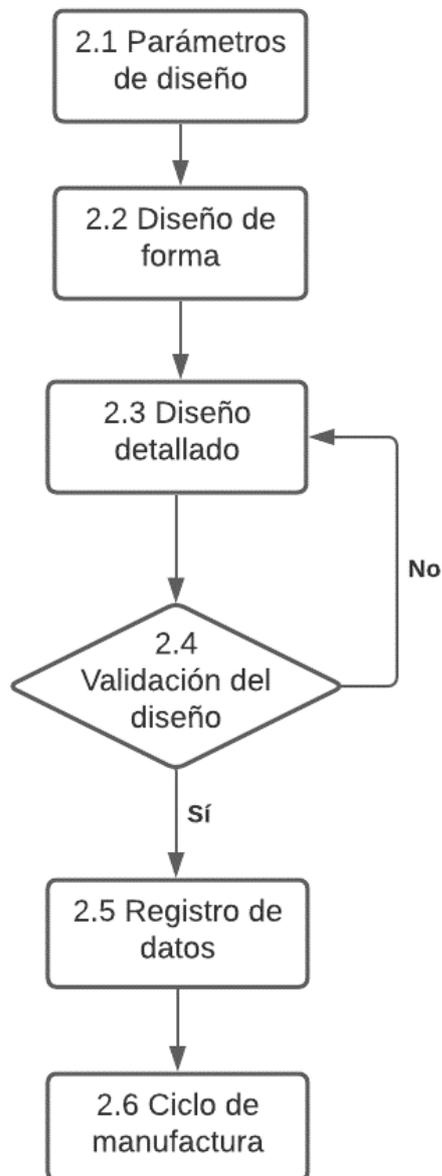


Figura 2.1 Metodología empleada.

Para la representación del proyecto se utilizaron las herramientas de diseño denominadas “caja negra” y “caja transparente”, las cuales se muestran en las

Figuras 2.2 y 2.3. El caudal Q_1 es igual a cero, mientras que el caudal Q_2 es mayor a cero.



Figura 2.2 Caja negra.

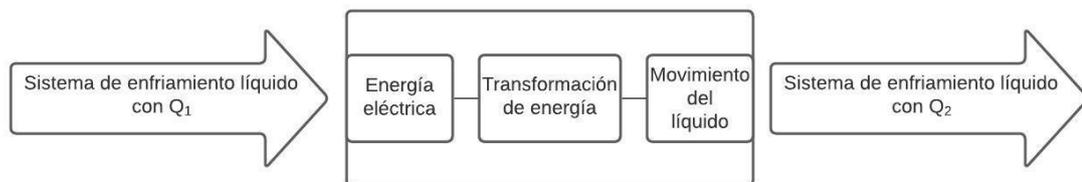


Figura 2.3 Caja transparente.

2.1 Parámetros de diseño

Antes de definir los parámetros de diseño de la bomba, se consultó con el cliente los requerimientos de este, con el propósito de derivarlos en especificaciones técnicas.

2.1.1 Requerimientos de diseño del cliente

- Tamaño compacto
- Agradable a la vista del usuario
- Fluido de trabajo agua destilada
- Manejo de fluidos con temperatura máxima de 60°C
- Caudal no mayor a 1000 L/hr
- Potencia máxima de 20 W
- Regulación de revoluciones mediante PWM

- Punto de operación de los sistemas de enfriamiento líquido para microprocesadores que existen en el mercado (500 L/hr y 2 mca)

2.1.2 Especificaciones de diseño

Para que el diseño de la bomba se adapte tanto a los requerimientos del cliente como a los requerimientos de operación de los sistemas de enfriamiento líquido para microprocesadores que existen en el mercado, se establecieron diferentes parámetros que se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Especificaciones de diseño.

Motor eléctrico	DC PWM
	Voltaje: 12 V
Entrada de poder	4-Pin PWM FAN Connector
	4-Pin Molex Connector (>10 W)
Potencia máxima	20 W
Dimensiones máximas	Largo = 100 mm
	Ancho = 100 mm
	Alto = 200 mm
Fluido	Agua destilada
Temperatura máxima del fluido	60 °C
Máxima razón de flujo	1000 L/hr
Punto nominal de operación	Razón de flujo = 500 L/hr
	Cabezal = 2 mca

2.2 Diseño de forma

Con los requerimientos y especificaciones proporcionados por el cliente se plantearon diferentes alternativas de diseño, las cuales se filtraron utilizando la herramienta de diseño denominada “matriz de selección” para generar el diseño de forma.

2.2.1 Alternativas

Con la finalidad de obtener el diseño de forma según los requerimientos

proporcionados por el cliente, se consideraron los siguientes aspectos como los tipos de puertos en la entrada y salida mostrados en la tabla 2.3, número de puertos de entrada y salida en la tabla 2.4, y la forma de la carcasa en la tabla 2.5.

Tipos de puertos en la entrada y salida: Se consideraron puertos roscados y no roscados, estas no presentan diferencias en cuanto a rendimiento, sin embargo, la fabricación de puertos no roscados es menos complejo que los puertos roscados. Por otro lado, un puerto roscado es más seguro que uno no roscado en cuanto a una posible separación entre las conexiones con las mangueras y/o posibles fugas del fluido de trabajo.

Número de puertos de entrada y salida: Se propusieron diseños con distintos números de puertos, debido a que un mayor número de puertos implica mayor facilidad de instalación, sin embargo, incrementa el costo y la dificultad de fabricación. En cuanto al rendimiento, este puede variar dependiendo de la conexión al puerto de salida.

Forma de la carcasa: Para seleccionar la forma de la carcasa se consideraron las más comunes en el mercado, las cuales son rectangulares y circularles. Las carcasas rectangulares son más estéticas y producen menor vibración. Sin embargo, para instalar una carcasa circular se necesita menos espacio en comparación a una rectangular.

Para determinar qué aspectos tienen mayor importancia en el diseño del sistema, se emplea una matriz de decisión que otorga pesos en una escala del 0 al 10 como se muestra en la tabla 2.2. En donde, 10 significa que el criterio es muy importante en comparación, 5 significa que poseen la misma importancia y el 0 hace referencia a una nula importancia en comparación. De modo que, los criterios a evaluar son los siguientes:

Rendimiento: Hace referencia del óptimo desempeño del diseño para mover el fluido con las especificaciones provistas por el cliente.

Manufactura: Este criterio hace referencia a la facilidad de fabricación que posee el diseño.

Estética: El criterio referencia a lo visualmente atractivo que posee el diseño.

Costo: Este criterio hace referencia a la inversión necesaria para obtener el diseño.

Instalación: En este contexto referencia a la facilidad de manejar y colocar la bomba en el ordenador.

Mantenimiento: Se refiere a la facilidad de proveerle mantenimiento al diseño.

Tabla 2.2 Comparación de los criterios de diseño.

Criterio	Rendimiento	Manufactura	Estética	Costo	Instalación	Mantenimiento	Total (Por fila)	Peso relativo (%)
Rendimiento	5	7	9	7	7	8	43	23.89
Manufactura	3	5	7	5	7	7	34	18.89
Estética	1	3	5	5	3	3	20	11.11
Costo	3	5	5	5	3	3	24	13.33
Instalación	3	3	7	7	5	7	32	17.78
Mantenimiento	2	3	7	7	3	5	27	15.00
Total							180	100.00

El rendimiento del diseño fue el criterio con mayor importancia, ya que este debe cumplir con las especificaciones requeridas por el cliente. La manufactura es el segundo peso más importante porque en la medida de lo posible, los componentes del diseño deben poder fabricarse o comprarse

en el mercado nacional. Por otro lado, la estética y costo son los criterios con menor importancia debido a que el cliente no da restricciones con respecto a estos parámetros. Finalmente, tanto la instalación como el mantenimiento del diseño son criterios con un peso relativo intermedio porque se busca que el diseño no presente incomodidades y sea de fácil uso para el usuario.

Tabla 2.3 Tipos de puertos en la entrada y salida.

	No roscado	Rosca hembra	Rosca macho
			
Rendimiento (23.89%)	5	5	5
Manufactura (18.89%)	5	4	6
Estética (11.11%)	5	9	8
Costo (13.33%)	9	7	5
Instalación (17.78%)	3	9	9
Mantenimiento (15.00%)	8	5	5
Puntuación ponderada	5.63	6.23	6.06

Tabla 2.4 Número de puertos de entrada y salida.

	1E/1S	2E/1S	3E/1S	2E/2S
				
Rendimiento (23.89%)	8	8	8	7
Manufactura (18.89%)	8	6	5	5
Estética (11.11%)	9	7	5	7
Costo (13.33%)	8	6	5	5
Instalación (17.78%)	4	7	8	8
Mantenimiento (15.00%)	8	6	5	5
Puntuación ponderada	7.40	6.77	6.25	6.23

Tabla 2.5 Tipo de carcasa.

	Rectangular	Circular
		
Rendimiento (23.89%)	5	5
Manufactura (18.89%)	8	7
Estética (11.11%)	7	9
Costo (13.33%)	8	8
Instalación (17.78%)	8	8
Mantenimiento (15.00%)	8	8
Puntuación ponderada	7.21	7.17

Al comparar las diferentes propuestas mediante una puntuación ponderada, se obtuvo que el diseño de forma debe ser desarrollado considerando que el tipo de puerto a la entrada y a la salida debe ser de tipo roscado hembra, con un solo puerto de entrada y de salida, además de que debe considerarse un tipo de carcasa con una geometría rectangular.

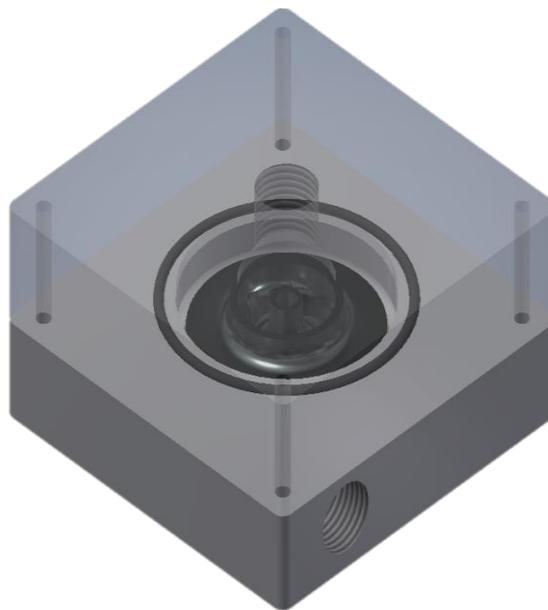


Figura 2.4 Diseño de forma.

2.3 Diseño detallado

Con las especificaciones de cabezal, flujo volumétrico y velocidad angular, los cuales representan a los datos de entrada, se realizó el dimensionamiento del impulsor y posteriormente de la voluta.

2.3.1 Dimensionamiento inicial

El diseño de la bomba centrífuga implica una gran cantidad de variables interdependientes, por lo que pueden existir varios diseños posibles para la misma función.

Para dimensionar el impulsor se usó una versión de prueba del software CF turbo, el cual pide como datos de entrada el cabezal, el flujo volumétrico y la velocidad angular. Diseñadores sugieren que se debe sobredimensionar estos datos. Por ejemplo, el flujo volumétrico se debe multiplicar por 1.05 y el cabezal por 1.1 (Tuzson, 2000). También indican que para obtener la máxima eficiencia el ángulo de entrada de los álabes debe estar entre 17° y 22° y el ángulo de salida de los álabes debe estar entre 22.5° y 28° .

Tabla 2.6 Dimensiones del impulsor.

Diámetro interior (mm)	11.8
Diámetro exterior (mm)	36
Altura del álabe en la entrada (mm)	5.83
Altura del álabe en la salida (mm)	3
Número de álabes	6
Ángulo de incidencia a la entrada ($^\circ$)	20
Ángulo de incidencia a la salida ($^\circ$)	23

Por otro lado, en el dimensionamiento de la voluta se consideró la distancia de seguridad entre el impulsor y la voluta, la cual es necesaria para determinar el diámetro base de la voluta (comúnmente este valor está definido como el 1.1 del diámetro exterior del impulsor) y las dimensiones

de los racores con rosca G 1/4 que existen en el mercado para la entrada y salida (diámetro interno de 8.5 mm).

Tabla 2.7 Dimensiones de la voluta

Diámetro base	39.6 mm
Diámetro del difusor	8.5 mm

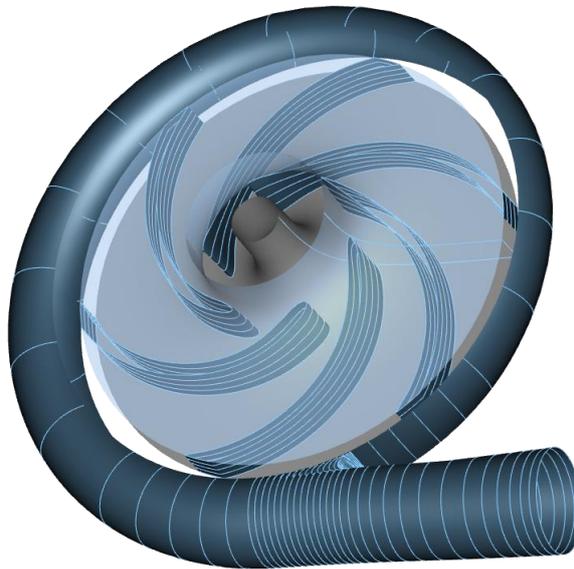


Figura 2.5 Perfil del impulsor y de la voluta dimensionado en CF Turbo.

2.3.2 Cálculos teóricos

Área interior y altura de los álabes en la entrada

La ecuación 2.1 permite determinar el área interior de los álabes en la entrada del impulsor y relacionarlo con la velocidad absoluta de flujo en la entrada y el flujo volumétrico. Una de las asunciones que se considerará para el diseño es que la velocidad absoluta de flujo en la succión sea igual a la velocidad de flujo en la entrada del impulsor.

$$A_1 = \frac{Q_n}{C_1} = \pi D_1 b_1 \quad (2.1)$$

A_1 : Área interior de los álabes en la entrada (m^2)

Q_n : Flujo volumétrico del diseño (m^3/s)

C_1 : Velocidad absoluta de flujo en la entrada del impulsor (m/s)

D_1 : Diámetro interior del impulsor (m)

b_1 : Altura de los álabes en la entrada (m)

Velocidad tangencial a la salida

La ecuación 2.2 representa a la velocidad tangencial a la salida del impulsor, la cual es influenciada por la velocidad angular que se le imparte al eje de este.

$$U_2 = \frac{D_2 \omega}{2} \quad (2.2)$$

U_2 : Velocidad tangencial a la salida (m/s)

D_2 : Diámetro exterior del impulsor (m)

ω : Velocidad angular (rad/s)

Área interior y altura de los álabes a la salida

La ecuación 2.6 permite determinar el área interior de los álabes en la salida del impulsor.

$$A_2 = \pi D_2 b_2 \quad (2.3)$$

A_2 : Área interior de los álabes en la salida (m^2)

D_2 : Diámetro exterior del impulsor (m)

b_2 : Altura de los álabes en la salida (m)

Velocidad meridional a la salida

La ecuación 2.4 representa a uno de los componentes de la velocidad tangencial, el cual se ve influenciado por el caudal y el área de los álabes en la salida del impulsor.

$$C_{m2} = \frac{Q_n}{A_2} \quad (2.4)$$

C_{m2} : Velocidad meridional a la salida (m/s)

Q_n : Flujo volumétrico del diseño (m³/s)

A_2 : Área a la salida (m²)

Componente de la velocidad tangencial a la salida

La ecuación 2.5 representa a la componente de velocidad tangencial a la salida del impulsor, obteniéndose a partir de conocer tanto a la velocidad tangencial como a la velocidad meridional y el ángulo de los álabes.

$$V_{u2} = U_2 - \frac{C_{m2}}{\tan \beta_2} \quad (2.5)$$

V_{u2} : Componente de la velocidad tangencial a la salida (m/s)

U_2 : Velocidad tangencial a la salida (m/s)

C_{m2} : Velocidad meridional a la salida (m/s)

β_2 : Ángulo de salida del álabe (°)

Cabezal teórico

El cabezal es una medida de la energía que puede alcanzar una bomba al usar la energía cinética que proviene del flujo volumétrico. La ecuación 2.6 muestra que el cabezal es directamente proporcional a la velocidad tangencial de salida y a su componente.

$$H_n = \frac{U_2 V_{u2}}{g} \quad (2.6)$$

H_n : Cabezal teórico del diseño (m)

U_2 : Velocidad tangencial a la salida (m/s)

V_{u2} : Componente de la velocidad tangencial a la salida (m/s)

g : Aceleración gravitacional (m/s²)

Cabezal medido o experimental

La ecuación 2.7 muestra la relación entre cabezal y la presión de salida de la bomba. La proporción entre estas dos variables viene definida por el inverso del producto de la densidad y la gravedad.

$$H = \frac{P_{salida}}{\rho g} \quad (2.7)$$

H : Cabezal medido o experimental (m)

P_{salida} : Presión a la salida de la bomba (Pa)

ρ : Densidad del fluido (Kg/m³)

g : Aceleración gravitacional (m/s²)

Flujo volumétrico medido o experimental

La ecuación 2.8 muestra la relación entre el flujo volumétrico con el área de salida y la velocidad de salida en la bomba.

$$Q = A_{salida} V_{salida} \quad (2.8)$$

Q : Flujo volumétrico medido o experimental (m³/s)

A_{salida} : Área a la salida de la bomba (m²)

V_{salida} : Velocidad a la salida de la bomba (m/s)

Eficiencia hidráulica

La ecuación 2.9 expresa que la eficiencia hidráulica es la relación entre el cabezal experimental y el cabezal teórico.

$$\eta_H = \frac{H}{H_n} \quad (2.9)$$

η_H : Eficiencia hidráulica (adimensional)

H : Cabezal medido o experimental (m)

H_n : Cabezal teórico del diseño (m)

Eficiencia Volumétrica

De forma análoga a la ecuación 2.9, la ecuación 2.10 indica que la eficiencia volumétrica es igual a la relación entre el flujo volumétrico experimental y flujo volumétrico teórico.

$$\eta_V = \frac{Q}{Q_n} \quad (2.10)$$

η_V : Eficiencia volumétrica (adimensional)

Q : Flujo volumétrico medido o experimental (m^3/s)

Q_n : Flujo volumétrico del diseño (m^3/s)

Eficiencia de la bomba

La ecuación 2.11 permite determinar la eficiencia de la bomba en términos de eficiencia hidráulica, volumétrica y mecánica.

$$\eta_b = \eta_H \eta_V \eta_M \quad (2.11)$$

η_b : Eficiencia de la bomba (adimensional)

η_H : Eficiencia hidráulica (adimensional)

η_V : Eficiencia volumétrica (adimensional)

η_M : Eficiencia mecánica (adimensional)

Potencia hidráulica

La potencia hidráulica descrita en la ecuación 2.12 es la potencia mínima requerida para transportar un fluido a un flujo volumétrico y cabezal específico.

$$P_H = \rho g Q_{BPE} H_{BPE} \quad (2.12)$$

P : Potencia de eje (W)

ρ : Densidad del fluido (Kg/m^3)

g : Aceleración gravitacional (m/s^2)

Q_{BPE} : Flujo volumétrico en el punto de máxima eficiencia (m^3/s)

H_{BPE} : Cabezal en el punto de máxima eficiencia (m^3/s)

Potencia de eje

La ecuación 2.13 permite determinar la potencia necesaria del motor de la bomba.

$$P = \alpha \frac{\rho g Q_{BPE} H_{BPE}}{\eta_{b BPE}} \quad (2.13)$$

P : Potencia de eje (W)

ρ : Densidad del fluido (Kg/m^3)

α : Factor de seguridad en condiciones de carga (adimensional)

g : Aceleración gravitacional (m/s^2)

Q_{BPE} : Flujo volumétrico en el punto de máxima eficiencia (m^3/s)

H_{BPE} : Cabezal en el punto de máxima eficiencia (m^3/s)

$\eta_{b BPE}$: Eficiencia de la bomba (adimensional)

Leyes de semejanza de bombas

Las ecuaciones 2.14, 2.15 y 2.16 permiten estimar los parámetros de funcionamiento en el punto nominal de operación de una bomba a partir de los parámetros de otra, modificando condiciones geométricas o de funcionamiento.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1} \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3 \quad (2.14)$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \quad (2.15)$$

$$+ \frac{P_{H2}}{P_{H1}} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right) \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^3 \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^5 \quad (2.16)$$

Q_2 : Flujo volumétrico estimado del prototipo (m^3/s)

Q_1 : Flujo volumétrico del diseño (m^3/s)

H_2 : Cabezal estimado del prototipo (m)

H_1 : Cabezal del diseño (m)

ω_2 : Velocidad angular del prototipo (rad/s)

ω_1 : Velocidad angular del diseño (rad/s)

D_2 : Diámetro del prototipo (m)

D_1 : Diámetro del diseño (m)

P_{H2} : Potencia hidráulica estimada del prototipo (W)

P_{H1} : Potencia hidráulica del diseño (W)

ρ_2 : Densidad del fluido del prototipo (Kg/m^3)

ρ_1 : Densidad del fluido del diseño (Kg/m^3)

2.4 Validación del diseño

2.4.1 Simulaciones

Se realizaron simulaciones con el fin de obtener el cabezal de 2 mca y el flujo volumétrico de 500 L/h en el punto de nominal de operación, variando el ángulo de salida de los álabes y el diámetro exterior del impulsor.

Para realizar esto, se generó el modelo CFD del fluido mediante el software CF Turbo mostrado en la Figura 2.6 y se lo exportó en formato STEP. CF Turbo es una herramienta de gran utilidad ya que genera automáticamente el modelo del diseño y en consecuencia el modelo CFD del fluido al variar los parámetros especificados anteriormente, lo cual permitió obtener los distintos modelos a simular con gran facilidad. Luego, se generó la forma de la entrada del fluido mediante la versión estudiantil del software Inventor de Autodesk y se la adicionó a cada modelo CFD como se muestra en la figura 2.7.



Figura 2.6 Modelo CFD obtenido mediante CF Turbo.



Figura 2.7 Modelo CFD modificado en Inventor.

Luego, en la versión estudiantil del software de simulación ANSYS se importaron los modelos CFD modificados en Inventor para generar el mallado. Todas las simulaciones realizadas a través del software ANSYS Workbench estuvieron limitadas por el número de elementos máximo que dispone la licencia estudiantil. De modo que, al poseer como máximo 512000 elementos disponibles el refinado de la malla podría influir en la precisión de los resultados (Correa Allepuz, 2007). Con la finalidad de solventar este problema, se optó por las características del mallado que se presentan en la tabla 2.8. El apéndice A muestra información más detallada acerca del mallado.

Tabla 2.8 Características del mallado.

Física de preferencia	CFD
Solucionador de preferencia	Fluent
Orden del elemento	Cuadrático
Tamaño del elemento	0.00052 m
Opción de inflación	Espesor total
Número de capas	5
Calidad mínima ortogonal	0.0129
Relación de aspecto máxima	408.71
Número de elementos	264015
Número de nodos	405018

Una vez realizado el mallado, se configuraron los parámetros físicos que permitan modelar correctamente el comportamiento del fluido de la bomba mostrados en la Tabla 2.9 y se procedió a encontrar una solución. Si la simulación no presenta problemas o errores de convergencia, se comprueba que el diseño cumple con las especificaciones del cliente y se continúa con el registro de los datos.

Tabla 2.9 Condiciones de simulación.

Modelo viscosidad	K-omega
Fluido	Agua @40°C
Condición del impulsor	Frame motion @3300 RPM
Condiciones de frontera	Presión entrada: 0 Pa
	Flujo másico salida: 0.1366 Kg/s
	Pared del impulsor: 3300 RPM

2.5 Registro de datos

En resultados mediante la función calculadora de promedio de área se obtienen los parámetros de interés tales como: velocidad de salida y presiones de entrada y salida. A partir de esto, se logró obtener un modelo CFD que cumple con las condiciones de operación proporcionadas por el cliente. Una vez que se determinó el modelo con las dimensiones finales del diseño, se generaron curvas de cabezal y eficiencia de la bomba en función del flujo volumétrico.

2.6 Ciclo de manufactura

Se desarrolló un ciclo de manufactura para los componentes de la bomba, considerando aspectos tales como: precisión de la geometría, calidad superficial, materiales comunes de fabricación o economía del proceso. Estas consideraciones son detalladas en la tabla 2.10 para el impulsor cuyo ciclo de fabricación en manufactura aditiva es generado a partir de las tablas desarrolladas por (Romero, 2021). En cuanto a la voluta y base siguen un ciclo de manufactura por mecanizado.

Tabla 2.10 Consideraciones de manufactura de los elementos.

Elemento	Consideraciones
Impulsor	Para la fabricación del diseño propuesto del impulsor se consideraron dos aspectos: precisión en la geometría y buena calidad superficial de la pieza resultante. La precisión en la geometría debido a las pequeñas dimensiones del diseño propuesto y la calidad superficial debido a que una baja calidad en la superficie de este componente puede producir mayores pérdidas de cabezal en la bomba por la fricción con el fluido.
Carcasa-Voluta	Para la fabricación de este componente se consideró el material más empleado en las bombas de este tipo. Además, se consideró una buena precisión geométrica y calidad superficial para minimizar las pérdidas de cabezal por fricción porque la voluta es la que dirige al fluido en movimiento.
Carcasa y Base	Para la fabricación de estos componentes se consideró que el material debe ser un metal, debido a que es lo más común para este tipo de piezas. El aluminio, acero inoxidable y bronce fueron los materiales propuestos para la fabricación. Finalmente, se seleccionó un material en base a los esfuerzos a los que estará sometido, peso y costo.

CAPÍTULO 3

3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Resultados de simulaciones

En esta sección, se muestran los resultados obtenidos mediante la simulación realizada en el programa ANSYS basado en un análisis por elementos finitos. La Figura 3.3 presenta el modelo junto con su respectiva entrada y salida, siendo la entrada de color azul y la salida de color rojo. En el apéndice A se muestran imágenes del procedimiento que se siguió para conseguir los resultados.

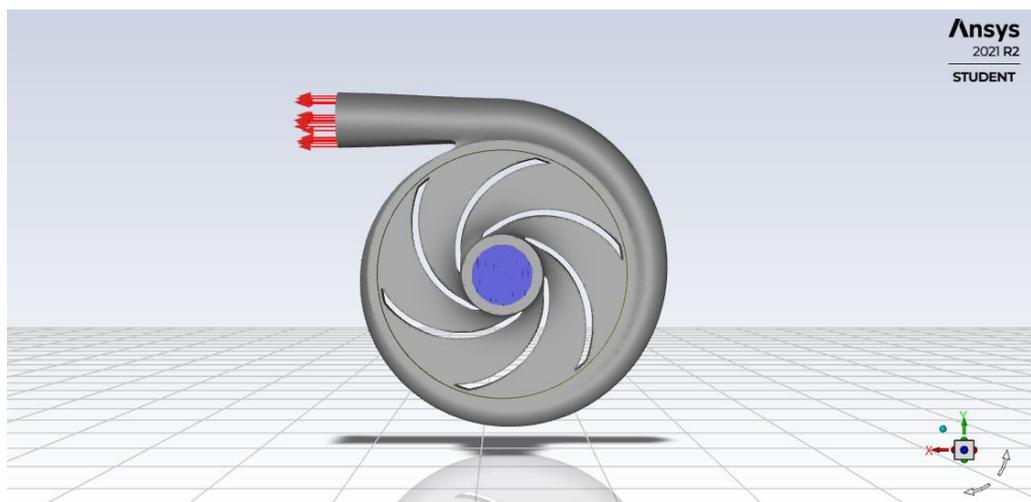


Figura 3.1 Modelo CFD visto desde el Setup.

El diseño de una bomba requiere considerar varios parámetros cuyo comportamiento es difícil de predecir, tal es el caso de la pérdida de cabezal en cada elemento. Por lo cual, se consideraron diferentes prototipos en los que se variaron el ángulo de salida de los álabes y el diámetro de salida de la voluta, con la finalidad de obtener un cabezal y un flujo volumétrico óptimo que permita cumplir con los requerimientos provistos por el cliente. De modo que, se pretende seleccionar el diámetro exterior del impulsor y ángulo de salida de los álabes en el punto de máxima eficiencia para el diseño final.

3.1.1 Punto de máxima eficiencia según geometría de la bomba

Se generaron cinco modelos manteniendo el diámetro exterior del impulsor constante y variando el ángulo de salida en un rango recomendado de 23-27 grados con pasos de 1 entre ellos (Avilés & Burneo, 2013). La tabla 3.1 muestra los resultados obtenidos como cabezal y flujo volumétrico a partir del ángulo de salida. Además, para este modelo se usó un diámetro exterior de 36 mm calculado inicialmente en las fases previas al modelamiento. De modo que, las cinco opciones no cumplen con el cabezal requerido de 2 metros. Por otro lado, la figura 3.5 muestra la tendencia de la eficiencia en función del ángulo de salida de los álabes.

Tabla 3.1 Resultados con diámetro exterior de 36 mm a diferentes ángulos.

B_2 (°)	P_{salida} (Pa)	V_{salida} (m/s)	H (m)	η_b
23	16393.7	2.44576	1.69	0.485
24	16582.7	2.44583	1.71	0.487
25	16544	2.44582	1.70	0.481
26	16468	2.4455	1.69	0.476
27	16619.8	2.44567	1.71	0.477

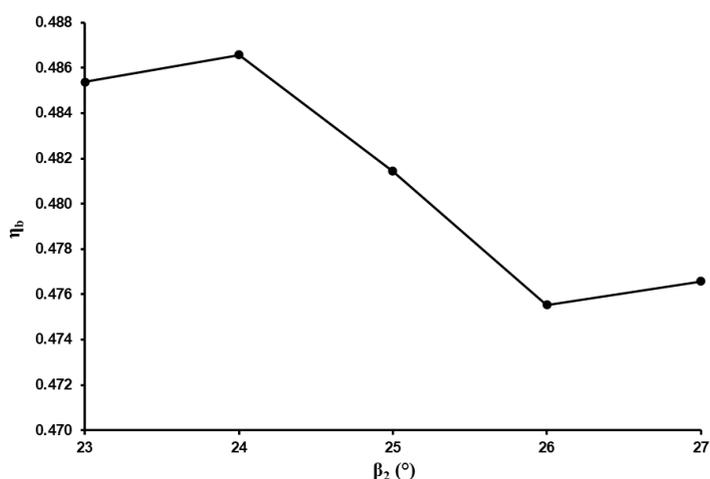


Figura 3.2 Eficiencia en función del ángulo con 36 mm de diámetro.

Como el programa CF realiza el cálculo de las dimensiones del impulsor.

mediante estimaciones (razón por el cual este software recomienda validar los resultados mediante CFD), era muy probable tener que modificar el diámetro (interior y/o exterior) del impulsor. De modo que, se aumentó el diámetro exterior del impulsor en 1 mm en función de que los resultados reflejaron que con un diámetro de 36 mm es posible alcanzar 1.7 m de cabezal. El redimensionamiento de la voluta consideró nuevamente la distancia de seguridad recomendada (Tuzson, 2000), por tal motivo, debido a la modificación de la geometría de la voluta, se procedió a variar nuevamente el ángulo de salida de los álabes para determinar el ángulo de mayor eficiencia.

La Tabla 3.2 muestra los resultados obtenidos al simular el modelo con diámetro exterior del impulsor de 37 mm a diferentes ángulos de salida de los álabes. Se observa que, a consecuencia de aumentar el diámetro exterior, se obtienen mayores valores de presión en la salida comparados con los valores obtenidos en la tabla 3.1. Similares tendencias se muestran en estudios relacionados al análisis de desempeño de una bomba centrífuga como se muestran en (Bacharoudis et al., 2008; Patel & Doshi, 2013). Además, En la Figura 3.7 se puede observar que el ángulo de salida de 23° es el más eficiente del diseño de igual forma que en el anterior modelo de 36 mm de diámetro. Debido a que tanto el cabezal como el caudal cumplen con los requerimientos del cliente, se aceptan estos parámetros para el diseño del impulsor y de la voluta.

Tabla 3.2 Resultados con diámetro exterior de 37 mm a diferentes ángulos.

B_2 (°)	P_{salida} (Pa)	V_{salida} (m/s)	H (m)	η_b
23	19031.1	2.44561	2.0	0.528
24	19114.5	2.44551	2.0	0.526
25	19104.4	2.44561	2.0	0.521
26	19154.3	2.44551	2.0	0.519
27	19309.9	2.445	2.0	0.520

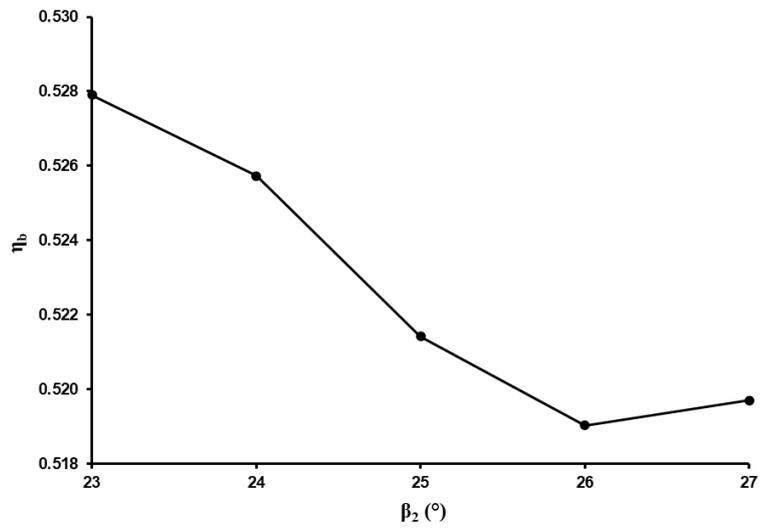


Figura 3.3 Eficiencia en función del ángulo con 37 mm de diámetro.

Tanto el contorno de velocidad como el contorno de presión se muestran en las figuras 3.8 y 3.9 respectivamente con un ángulo de 23° y un diámetro exterior de 37 mm.

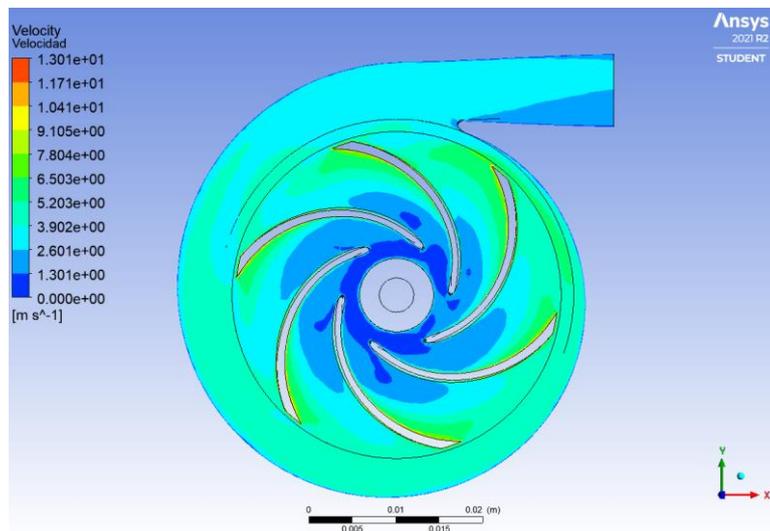


Figura 3.4 contorno de velocidad.

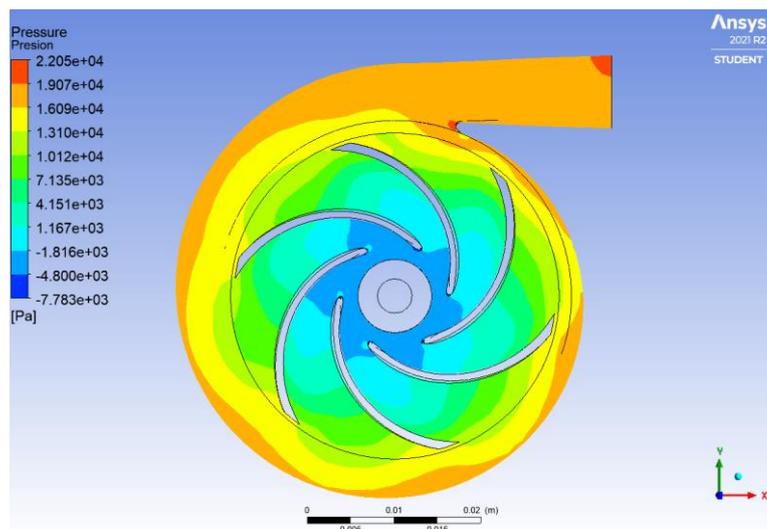


Figura 3.5 Contorno de presión.

3.2 Resultados teóricos

Tanto los valores de cabezal como de flujo volumétrico fueron obtenidos a partir de las ecuaciones enunciadas en la sección 2.3.2. En donde, en función del ángulo de salida y del diámetro exterior se obtuvieron los valores teóricos de los modelos implementados en la simulación. Las figuras 3.8 y 3.9 muestran la tendencia teórica de la bomba diseñada.

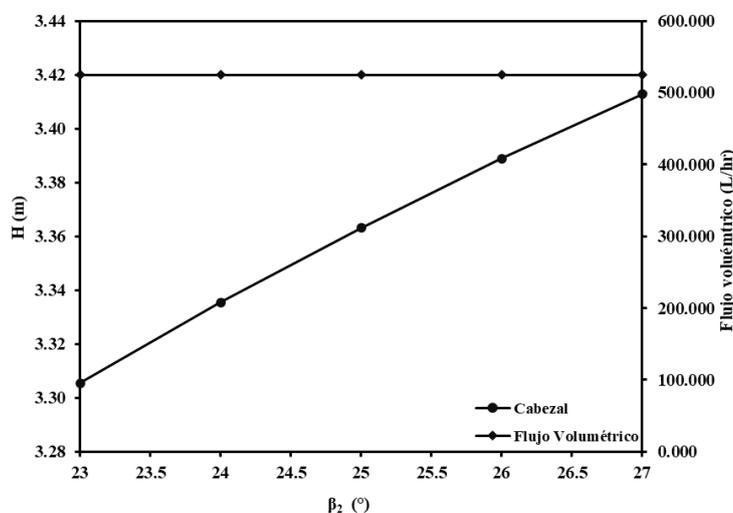


Figura 3.6 Cabezal y flujo volumétrico teórico a 36 mm de diámetro.

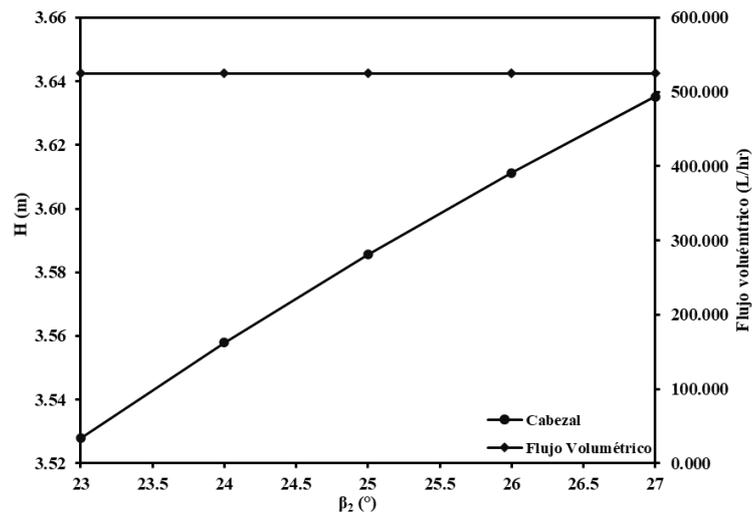


Figura 3.7 Cabezal y flujo volumétrico teórico a 37 mm de diámetro.

3.2.1 Curvas H y η_b Vs. Q del diseño final

La figura 3.8 muestra la tendencia de las curvas de cabezal y eficiencia en función del flujo volumétrico. El punto de máxima eficiencia corresponde a un cabezal de 2 m y 500 L/hr cumpliendo con las especificaciones del cliente. Se observa que el cabezal máximo que puede ofrecer cuando no hay flujo es de aproximadamente 3.4 m y el flujo volumétrico máximo con el que puede trabajar equivale 798 L/hr. Ambas curvas siguen una tendencia cuadrática la cual es la más acorde según los datos generados por la simulación con diferentes condiciones de borde. Además, la eficiencia en punto nominal de operación es de 0.53, el cual está acorde a las eficiencias de las bombas destinadas para las aplicaciones de enfriamiento de microprocesadores. Los valores pueden ser consultados en la tabla 3.3.

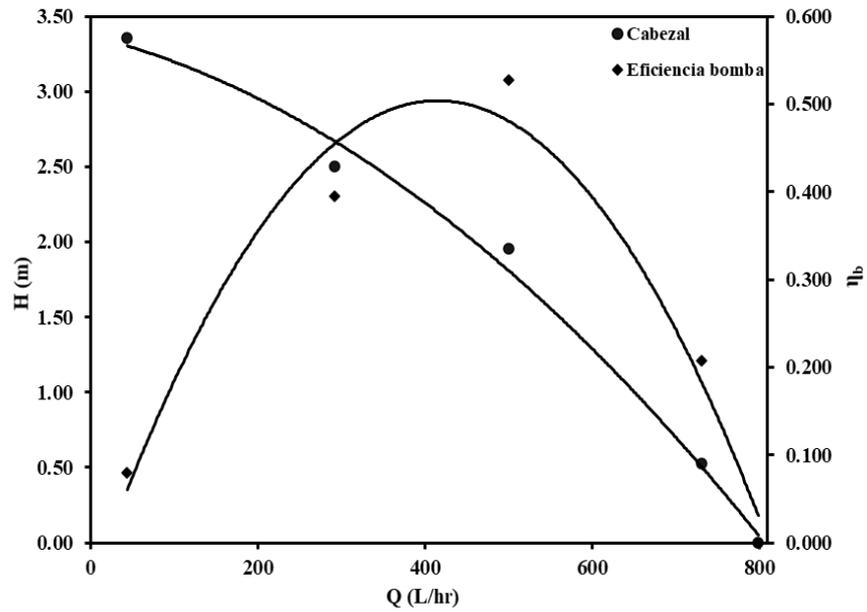


Figura 3.8 Curvas de la bomba.

Tabla 3.3 H, Q, η_b , P_H , P

H (m)	Q (L/hr)	η_b	P_H (W)	P (W)
3.4	44	0.080	2.64	5.00
2.5	292	0.395		
2.0	500	0.528		
0.5	731	0.208		
0.0	798	0.000		

3.3 Selección de componentes adicionales

Para el diseño del prototipo final se seleccionaron varios elementos, los cuales se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Componentes adicionales.

Componente	Imagen
Motor D5 PWM	 A black cylindrical motor with a grey cap and a small grey component attached to the side.
O-Ring 62 x 2	 A black, circular O-ring seal.
Tornillo hexagonal ISO 7380 - M4 x 16	 A single hexagonal bolt with a hexagonal head.
Tornillo de cabeza hueca avellanada DIN 7991 - M4 x 10	 Two screws with hexagonal heads and a central hole through the head.

3.4 Solución propuesta

La figura 3.11 muestra la solución propuesta a partir de los resultados obtenidos en la que se puede observar dos vistas del diseño de la bomba. La vista (a) muestra el diseño final del impulsor, mientras que la vista (b) muestra el ensamble final del diseño de la bomba. En el apéndice D se puede observar el plano de la bomba con más detalle. Además, cabe recalcar que para el acople del impulsor con la bomba se emplea el pegamento ADINOX C338, el cual es utilizado para unirlo junto con el rotor de imanes permanentes.

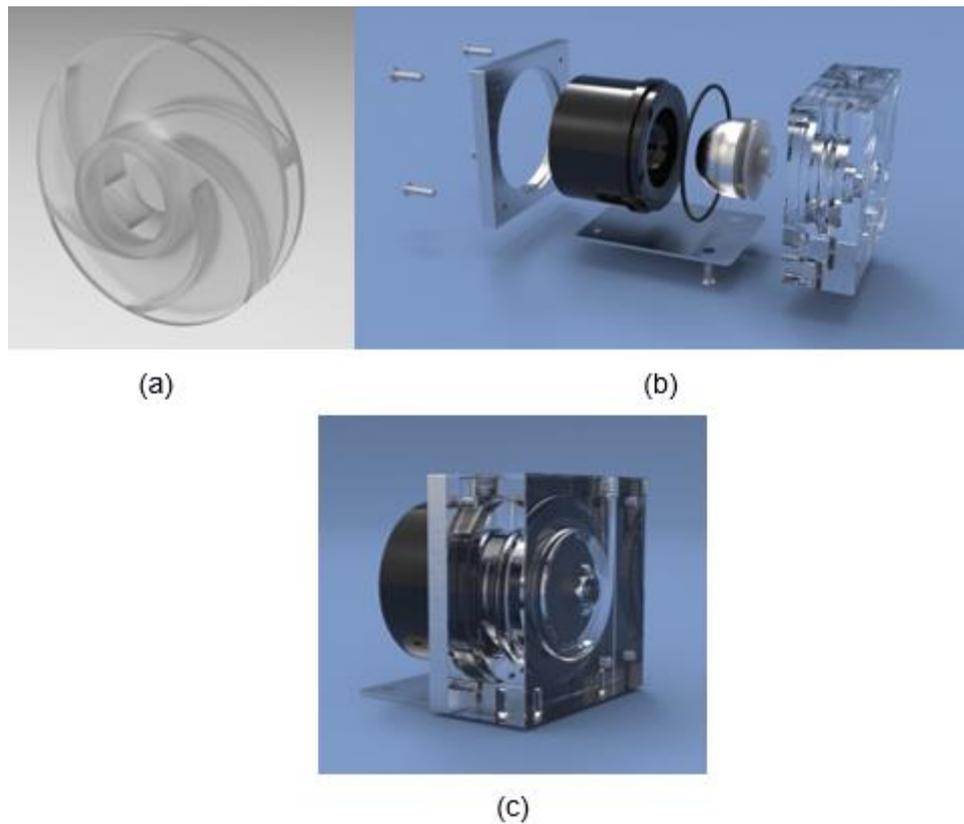


Figura 3.9 (a) vista del impulsor (b) vista explotada (c) vista del ensamble.

3.5 Procesos de manufactura

Los impulsores de las bombas comúnmente se fabrican mediante fundición, sin embargo, se descartó debido a que las piezas resultantes no poseen una buena tolerancia dimensional y a la baja calidad superficial de estas. El otro proceso de manufactura que se está utilizando recientemente para fabricar impulsores de bombas es la impresión 3D, el cual cumple con los dos aspectos necesarios. Modelado por deposición difusa (FDM) e inyección de material (MJ) son los tipos de impresión 3D comúnmente usados a nivel nacional. Se seleccionó proceso MJ debido a que tanto la precisión y como la calidad de piezas resultantes son mejores en comparación a las piezas resultantes por el proceso FDM. El material seleccionado fue el termoplástico denominado acrilonitrilo butadieno estireno, llamado ABS por sus siglas en inglés, debido a sus propiedades de dureza, rigidez, tenacidad y resistencia a temperaturas extremas.

Para la carcasa-voluta se consideró el material más común para la fabricación de este componente, el cual es el acrílico. En consecuencia, el proceso de manufactura a emplear debe ser el mecanizado, teniendo presente que la pieza resultante debe tener una buena precisión geométrica y calidad superficial para minimizar las pérdidas de cabezal.

Al igual que para la carcasa-voluta, para la fabricación de la carcasa y base se consideraron los materiales más utilizados para estos tipos de componentes, los cuales son: aluminio, acero inoxidable y bronce. Finalmente, el aluminio fue seleccionado porque las piezas no estarán sometidas a grandes esfuerzos y por su bajo peso y costo en comparación a los otros materiales.

La Tabla 3.5 muestra los resultados del proceso de manufactura, el material y el tiempo de fabricación de cada componente. El ciclo de fabricación completo se encuentra en el apéndice C.

Tabla 3.5 Resultados del proceso de fabricación de cada componente.

Componente	Material	Proceso de manufactura	Tiempo (h)
Impulsor	ABS	Impresión 3D	3.53
Carcasa-Voluta	Acrílico	Mecanizado	0.052
Carcasa	Aluminio	Mecanizado	0.065
Base	Aluminio	Mecanizado	0.0056
Total			3.65

A los tiempos de fabricación de los elementos mecanizados se les debe considerar un tiempo de puesta a punto que es parte del preproceso de fabricación. Al ser elementos pequeños se recomienda añadir como mínimo un tiempo de 30 minutos por elemento.

3.6 Análisis de costos

En las Tabla 3.6 se muestran los costos considerados al momento de diseñar

y fabricar la bomba para sistemas de enfriamiento líquido.

En primer lugar, se consideró una inversión inicial de \$500 debido a costos de ingeniería, los cuales son solo necesarios realizarlos una vez. De modo que, al considerar costos de fabricación y de componentes se obtiene un costo de fabricación de la bomba de \$150.83.

Tabla 3.6 Costos generales del diseño de la bomba.

ítem	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Diseño	1	\$ 300.00	\$ 300.00
Simulaciones	10	\$ 20.00	\$ 200.00
Subtotal: costo de Ingeniería			\$ 500.00
Manufactura (Impresión 3D)	1	\$ 41.94	\$ 41.94
Manufactura (Mecanizado)	3	\$ 10.00	\$ 30.00
Subtotal: Costo de fabricación			\$ 71.94
Motor D5 PWM	1	\$ 77.80	\$ 77.80
O-Ring	1	\$ 0.37	\$ 0.37
Tornillo de cabeza redonda hueca ISO 7380 - M4 x 16	4	\$ 0.12	\$ 0.48
Tornillo de cabeza hueca avellanada DIN 7991 - M4 x 10	2	\$ 0.12	\$ 0.24
Subtotal: Componentes adicionales			\$ 78.89
Total			\$ 650.83

El costo de producción puede disminuir hasta un 30% si se lo fabrica a gran escala.

CAPÍTULO 4

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Se validó mediante CFD el diseño de una bomba para sistemas de enfriamiento líquido para microprocesadores capaz de operar a 2 metros de cabezal de agua y 500 litros por hora en el punto nominal.
- La geometría de los elementos diseñados de la bomba fue obtenida mediante el uso del software ANSYS, utilizado para simular el comportamiento del fluido en diversos prototipos variando el ángulo de salida de los álabes y diámetro exterior del impulsor. Los resultados no reflejaron una diferencia significativa en el cabezal de la bomba en función del ángulo de salida de los álabes.
- La eficiencia varía en una tendencia decreciente en la mayoría de los datos. Por otro lado, variar el diámetro exterior del impulsor tuvo un impacto significativo en el cabezal de salida, obteniéndose valores más altos.
- La selección de la tecnología de impresión 3D para la fabricación del impulsor de la bomba diseñada se sustenta en la calidad superficial y precisión de las medidas de la pieza resultante.
- El tipo de impresión MJ fue seleccionado debido a la importancia de la precisión en las medidas, pequeñas variaciones en el diámetro exterior y en el ángulo de salida de los álabes pueden significar grandes cambios en los parámetros de la bomba diseñada.
- Se desarrolló ciclo de fabricación para tecnologías de impresión 3D de cada componente de la bomba diseñada en el cual se describe el tipo de impresión, la máquina a emplear y parámetros relevantes como la

temperatura del material, el peso del material, patrón de impresión, el porcentaje de relleno, entre otros.

4.2 Recomendaciones

- En el mercado mundial existen diversos motores que pueden satisfacer las condiciones de trabajo de ciertos sistemas de bombeo dedicado al enfriamiento líquido. Sin embargo, no existe un sector industrial de tecnología computacional en el país que esté dedicada a desarrollar este tipo de implementos para sistemas de enfriamiento líquido, por lo que adquirirlos y encontrar especificaciones de motores puede representar un problema. De modo que, se recomienda realizar el diseño de un motor capaz de variar sus revoluciones en un rango 1800-4800 RPM, las cuales son las velocidades habituales en las que operan estos tipos de sistemas de bombeos. Además, considerar las emergentes tecnologías de motores esféricos sin eje con imanes permanentes que evitan el uso de selladores mecánicos.
- Es recomendable abordar el problema simulando las condiciones de arranque del sistema mediante el uso de un régimen transitorio. Debido a la licencia estudiantil, el número de elementos y por lo tanto el refinamiento del mallado no permitieron obtener resultados empleando este régimen por problemas en la convergencia de la solución.
- Mediante un prototipo de la solución planteada se puede originar un nuevo proyecto que compare los resultados de las simulaciones con los experimentales, evaluando la propuesta de solución de este proyecto.
- Incluir un equipo que permita variar las revoluciones del motor y en consecuencia los parámetros de operación de la bomba en función de la temperatura óptima a la cual deben operar los microprocesadores.

- Se recomienda determinar la rentabilidad de los sistemas de enfriamiento líquido por bombeo en el territorio nacional, con la finalidad de analizar el impacto que tendrían este tipo de sistemas.

BIBLIOGRAFÍA

- Adiaconitei, A., Vintila, I. S., Mihalache, R., Paraschiv, A., Frigioescu, T., Vladut, M., & Pambaguián, L. (2021). A study on using the additive manufacturing process for the development of a closed pump impeller for mechanically pumped fluid loop systems. *Materials*, 14(4), 1–17. <https://doi.org/10.3390/ma14040967>
- Arnés, P., & Herrera, K. (2020). *Diseño de un Sistema de Enfriamiento Líquido para Unidades de Procesamiento Gráfico basado en Dinámica de Fluidos Computacional* [Escuela Superior Politécnica del Litoral]. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/19134>
- Avilés, P., & Burneo, J. (2013). *MODERNIZACION DEEL SET DE BOMBAS CENTRIFUGAS MARCA GILBERT GILKES Y DISEÑO CONSTRUCCIÓN DE DOS IMPULSORES INTERCAMBIABLES PARA LA PRÁCTICAS EXPERIMENTALES DEL LABORATORIO DE TURBOMÁQUINAS DEL DECEM. ESPE.*
- Bacharoudis, E. C., Filios, A. E., Mentzos, M. D., & Margaris, D. P. (2008). Parametric Study of a Centrifugal Pump Impeller by Varying the Outlet Blade Angle. *The Open Mechanical Engineering Journal*, 2(1), 75–83. <https://doi.org/10.2174/1874155x00802010075>
- Bartle, R. A. (2016). Implications on design of rapid manufacturing. *MMOs from the Inside Out*, 217, 189–353. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-1724-5_2
- Christoph, R., Muñoz, R., & Hernández, Á. (2017). Manufactura Aditiva. *Realidad y Reflexión*, 43, 97. <https://doi.org/10.5377/ryr.v43i0.3552>
- Correa Allepuz, E. (2007). Influencia de la Calidad de Malla en las Simulaciones. Uso de Condiciones de Contorno Periódicas. *Universidad de Sevilla*, 145–161.
- Gallego, J. carlos, & Folgado, L. (2011). *Montaje y mantenimiento de equipos*. Editex.
- Gao, T., Tang, H., Cui, Y., & Luo, Z. (2018). A Test Study of Technology Cooling Loop in a Liquid Cooling System. *Proceedings of the 17th InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, ITherm 2018*, 740–747. <https://doi.org/10.1109/ITHERM.2018.8419519>
- Girdhar, P., & Moniz, O. (2005). *Practical Centrifugal Pumps* (S. Mackay (ed.); First edit). Elsevier.

- Liang, K., Li, Z., Chen, M., & Jiang, H. (2019). Comparisons between heat pipe, thermoelectric system, and vapour compression refrigeration system for electronics cooling. *Applied Thermal Engineering*, 146, 260–267. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.09.120>
- Lobanoff, V., & Ross, R. (1992). *Centrifugal Pumps: Design & Application* (Second edi). Elsevier.
- Masataka, Saito, Y., Nguyen, T., Wuttijumnong, V., Wu, X., & Nguyen, T. (2005). Revolution in fan heat sink cooling technology to extend and maximize air cooling for high performance processors in laptop / desktop /server application. *Proceedings of the ASME/Pacific Rim Technical Conference and Exhibition on Integration and Packaging of MEMS, NEMS, and Electronic Systems: Advances in Electronic Packaging 2005, PART A*, 431–438. <https://doi.org/10.1115/ipack2005-73286>
- Nath, P. D. (2021). *Investigation on the Performance Test on Liquid Cooling System for CPU of Desktop Computer Cost Effective Enhancement Investigation on the Performance Test on Liquid Cooling System for CPU of Desktop Computer Cost Effective Enhancement. January.*
- Patel, M. G., & Doshi, A. V. (2013). Effect of Impeller Blade Exit Angle on the Performance of Centrifugal Pump. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(1), 702–706.
- Romero, R. (2021). *Diseño del proceso de fabricación por manufactura aditiva de un elemento mecánico: engranaje recto* [ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL]. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/19134>
- Tuzson, J. (2000). *Centrifugal pump design*. Wiley.

APÉNDICES

APÉNDICE A

MEMORIA DE SIMULACIONES

A		
1	 Fluid Flow (Fluent)	
2	 Geometry	✓
3	 Mesh	✓
4	 Setup	✓
5	 Solution	✓
6	 Results	✓

Figura A.1 Esquema de trabajo en ANSYS Fluent.

Display	
Display Style	Use Geometry Setting
Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Element Order	Quadratic
<input type="checkbox"/> Element Size	5,2e-004 m
Export Format	Standard
Export Preview Surface Mesh	No
Sizing	
Use Adaptive Sizing	Yes
Resolution	Default (2)
Mesh Defeaturing	Yes
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Initial Size Seed	Assembly
Bounding Box Diagonal	7,4527e-002 m
Average Surface Area	1,0612e-004 m ²
Minimum Edge Length	9,0773e-006 m

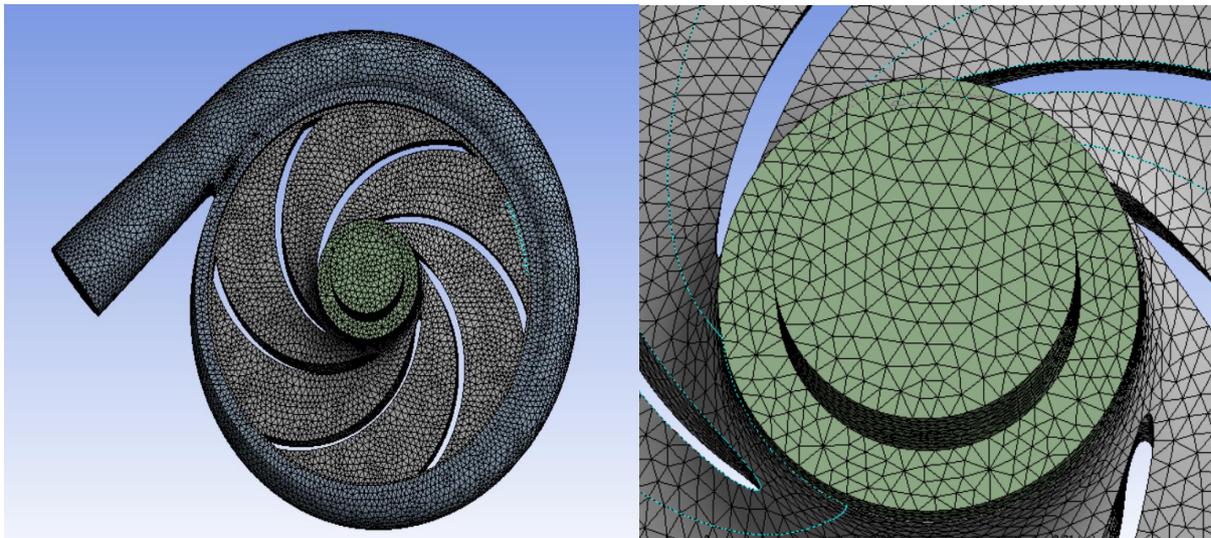
Figura A.2 Detalles del mallado realizado en la herramienta Mesh.

Sizing	
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.900000)
Smoothing	High
Mesh Metric	Orthogonal Quality
<input type="checkbox"/> Min	5,0436e-003
<input type="checkbox"/> Max	0,98871
<input type="checkbox"/> Average	0,74604
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,11203
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Total Thickness
<input type="checkbox"/> Number of Layers	5
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,2
<input type="checkbox"/> Maximum Thickness	Please Define
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Advanced	
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	362903
<input type="checkbox"/> Elements	235652
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.900000)
Smoothing	High
Mesh Metric	Skewness 
<input type="checkbox"/> Min	2,403e-004
<input type="checkbox"/> Max	0,99496
<input type="checkbox"/> Average	0,25273
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,11404

Figura A.3 Detalles del mallado (continuación).

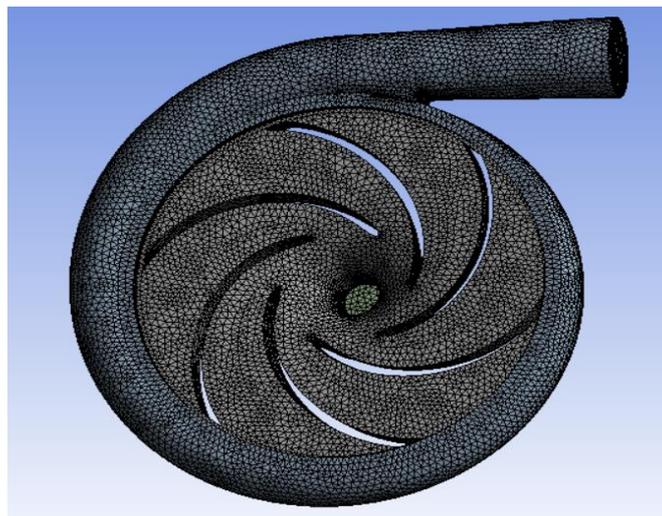
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	3 Bodies
[-] Definition	
Suppressed	No
Method	Tetrahedrons
Algorithm	Patch Conforming
Element Order	Quadratic

Figura A.4 Detalles del mallado (Final).



(a)

(b)



(c)

Figura A.5 (a) vista frontal (b) vista con aumento al mallado (c) vista posterior.

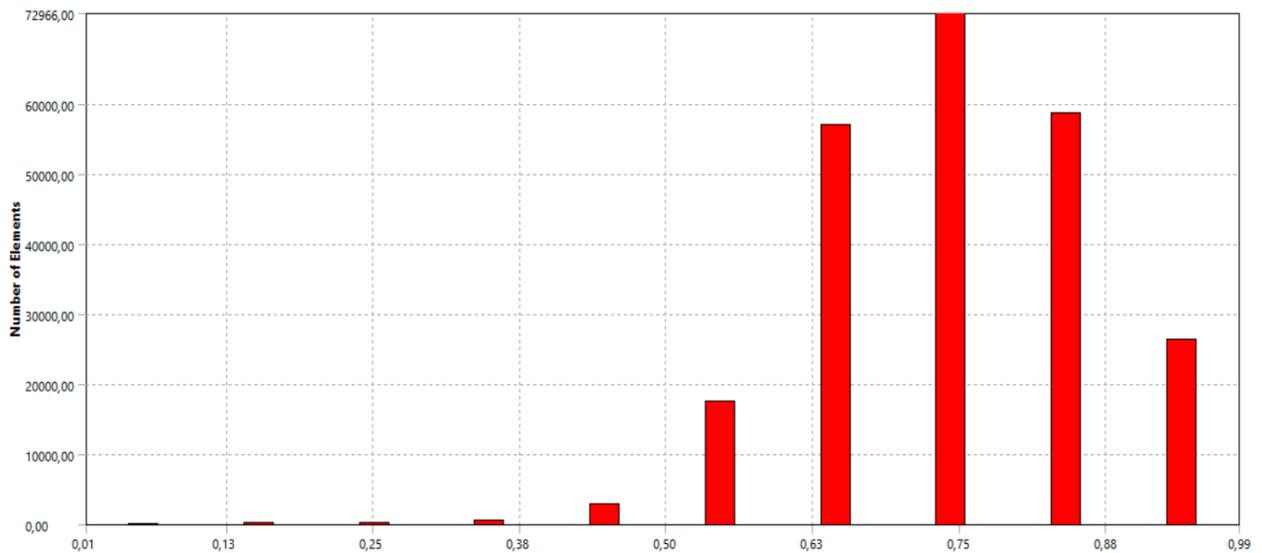


Figura A.6 Calidad gráfica del mallado

Mesh Quality:
 Minimum Orthogonal Quality = 1.13300e-01 cell 8912 on zone 8 (ID: 12956 on partition: 0) at location (7.33837e-03, 1.91287e-02, 6.21526e-03)
 Maximum Aspect Ratio = 3.31106e+01 cell 3200 on zone 8 (ID: 3886 on partition: 0) at location (2.75019e-03, 2.01613e-02, 6.04877e-03)

Figura A.7 Calidad del mallado después de mejorarla en el setup.

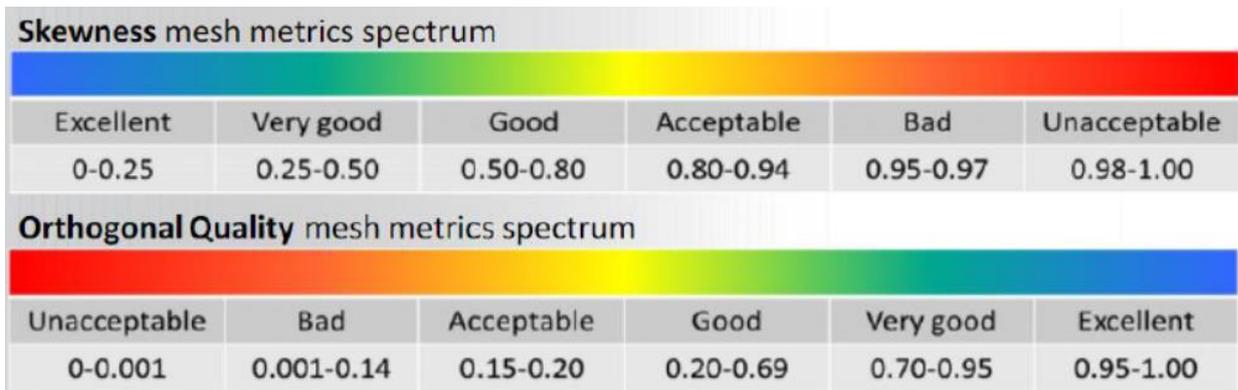
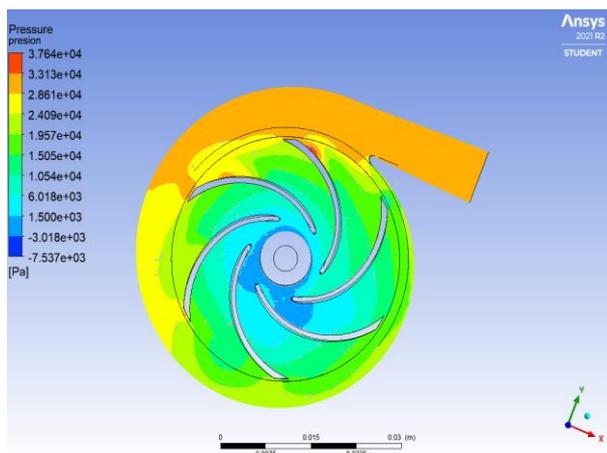
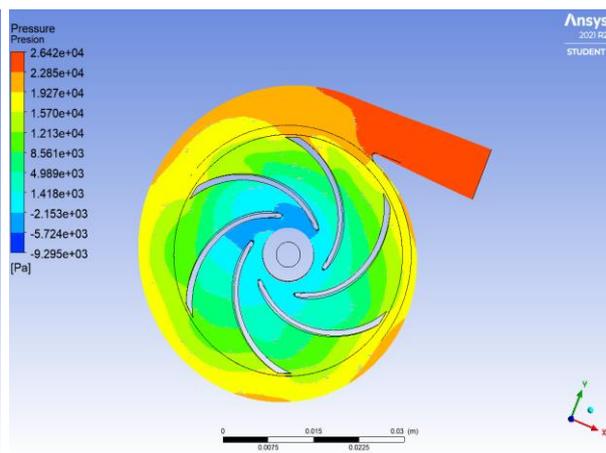


Figura A.8 Espectro de calidad del mallado.

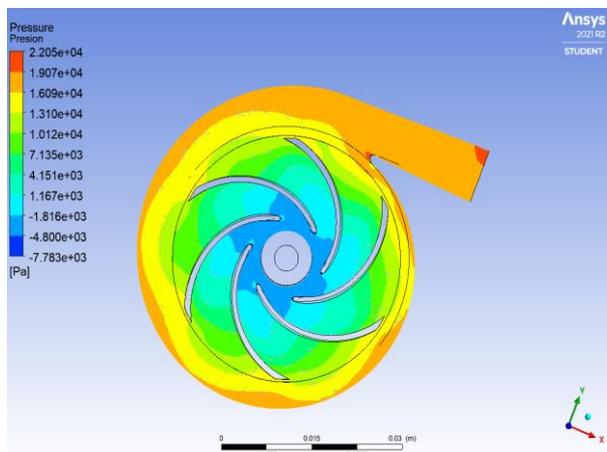
En la figura B3 se encuentra la calidad del mallado, en la que según la figura B.7 se encuentra en un rango de “muy bueno” en cuanto a la calidad ortogonal. Además, la oblicuidad se encuentra en el rango de “excelente”.



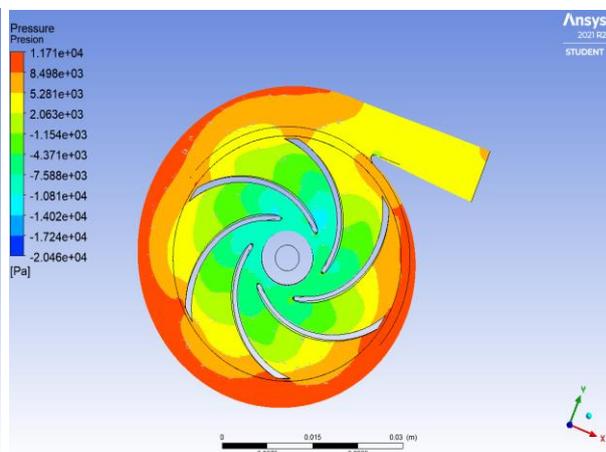
(a)



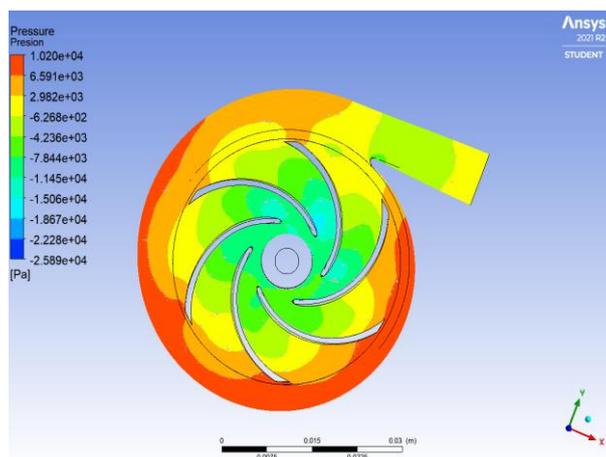
(b)



(c)

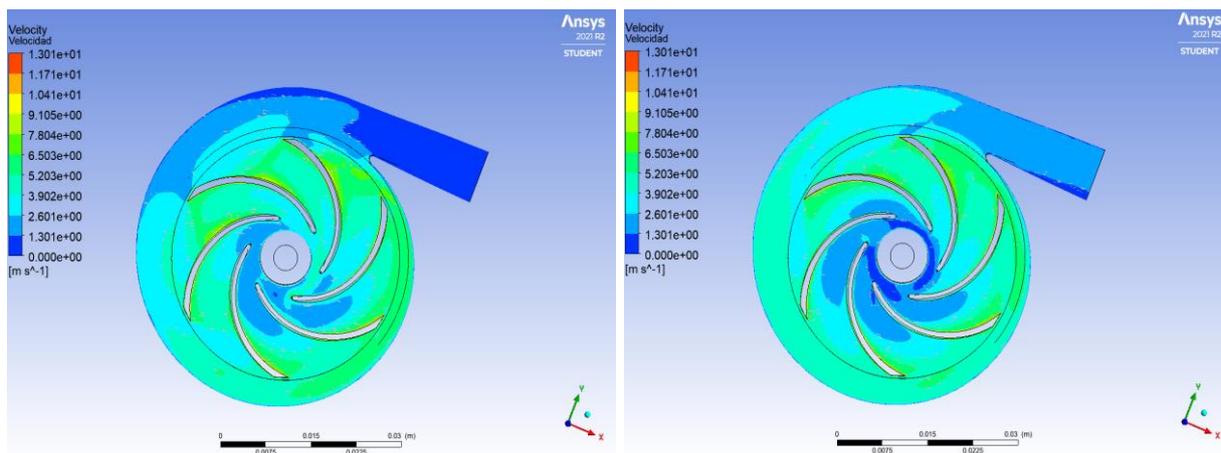


(d)

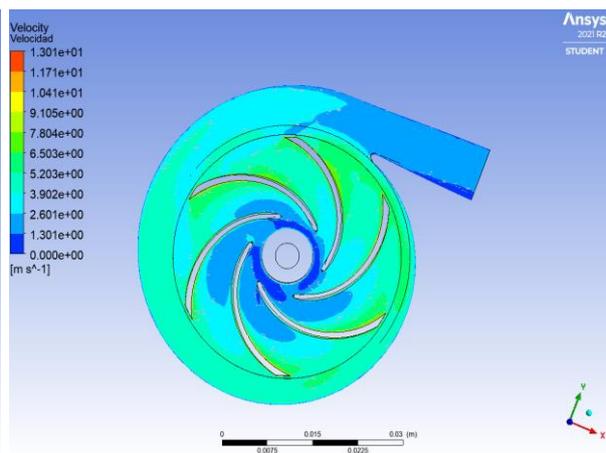


(e)

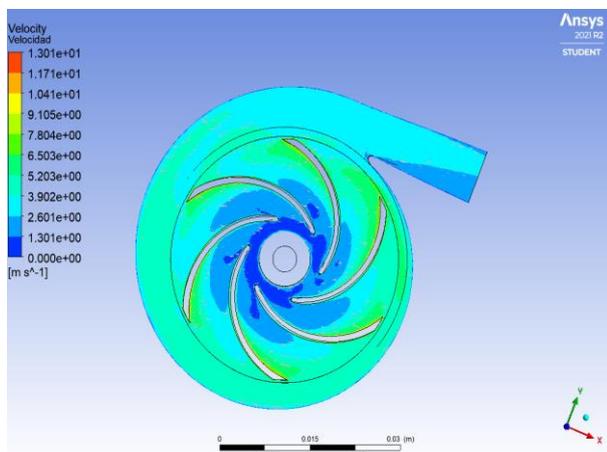
Figura A.9 Cabezal de (a) 3.4 (b) 2.5 (c) 2.0 (d) 0.5 (e) 0 [m].



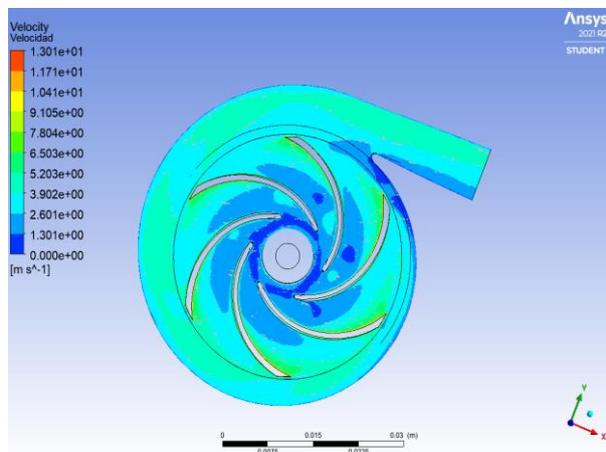
(a)



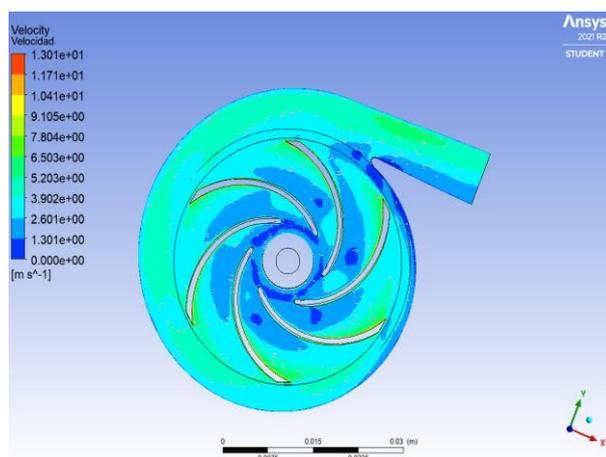
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura A.10 Flujos volumétricos de (a) 44 (b) 292 (c) 500 (d) 731 (e) 798 [L/hr].

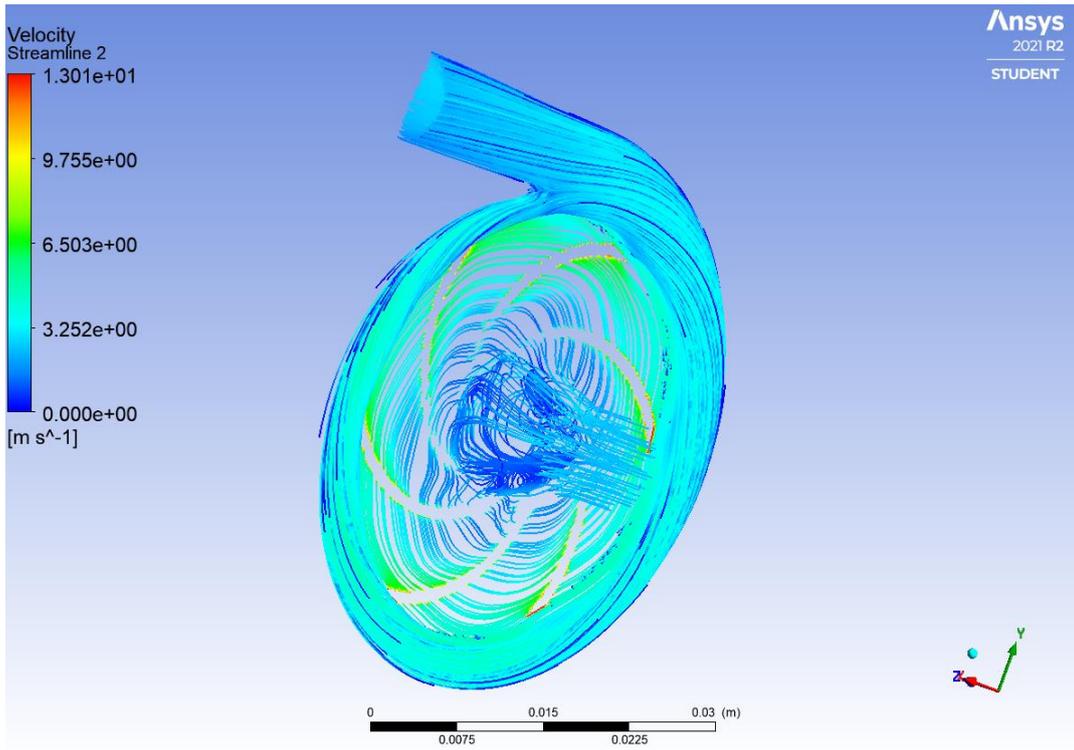


Figura A.11 Líneas de flujo

APÉNDICE B

MEMORIA DE CÁLCULOS

Tabla B.1 Cálculo de velocidades y cabezal de la bomba @3300 RPM

Diámetro exterior (mm)	Ángulo de salida (°)	Q _n (L/hr)	C ₁ (m/s)	U ₂ (m/s)	Cm ₂ (m/s)	V _{u2} (m/s)	H _n (m)	Eficiencia Hidráulica	Eficiencia Volumétrica	Eficiencia de la bomba
36	23	525.000	0.674771	6.220353	0.429817	5.207769	3.305527	0.510022	0.951666	0.485371
	24	525.000	0.674771	6.220353	0.429817	5.254970	3.335487	0.511268	0.951694	0.486571
	25	525.000	0.674771	6.220353	0.429817	5.298609	3.363186	0.505874	0.951690	0.481435
	26	525.000	0.674771	6.220353	0.429817	5.339099	3.388886	0.499732	0.951565	0.475527
	27	525.000	0.674771	6.220353	0.429817	5.376791	3.412810	0.500802	0.951631	0.476579
37	23	525.000	0.674771	6.393141	0.418200	5.407924	3.527920	0.554751	0.951608	0.527905
	24	525.000	0.674771	6.393141	0.418200	5.453849	3.557880	0.552490	0.951569	0.525733
	25	525.000	0.674771	6.393141	0.418200	5.496308	3.585579	0.547932	0.951608	0.521417
	26	525.000	0.674771	6.393141	0.418200	5.535704	3.611279	0.545454	0.951569	0.519037
	27	525.000	0.674771	6.393141	0.418200	5.572377	3.635204	0.546266	0.951371	0.519701

Tabla B.2 Cálculo de velocidad y cabezal de la bomba @4800 RPM

Diámetro exterior (mm)	Ángulo de salida (°)	Q _n (L/hr)	C ₁ (m/s)	U ₂ (m/s)	Cm ₂ (m/s)	V _{u2} (m/s)	H _n (m)	Eficiencia Hidráulica	Eficiencia Volumétrica	Eficiencia de la bomba
37	23	727.000	0.934397	9.299114	0.579107	7.934823	7.529268	0.549964	1	0.55

Tabla B.3 Cálculo de Potencia de eje @4800 RPM

Temperatura (°C)	Diámetro exterior (mm)	Ángulo de salida (°)	Cabezal neto (m)	Flujo volumétrico (L/hr)	Potencia Hidráulica (W)	Eficiencia de la bomba	Potencia del eje (W)
60	37	23	4.1	727	8.05	0.55	14.64
40	37	23	4.1	727	8.13	0.55	14.78

APÉNDICE C

CICLO DE FABRICACIÓN

Código: Carcasa

O0001	N16 I-22.25 J0	N33 G01 Z5.5 F185.687
N1 G21	N17 G01 X0	N34 G41 D25 X-13.724 Y10.026
N2 (20MM CRB 2FL 38 LOC)	N18 G00 Z10.5	F557.062
N3 G91 G28 X0 Y0 Z0	N19 Z8.25	N35 X-21.702 Y3.354
N4 T05 M06	N20 G01 Z5.5 F185.687	N36 G03 X-22.411 Y1.997 I1.283 J-
N5 S3323 M03	N21 X6.25 F371.374	1.534
	N22 G03 I-6.25 J0 F742.749	N37 X-22.5 Y0 I22.411 J-1.997
N6 (Desbaste1)	N23 G01 X14.25	F742.749
N7 G90 G54 G00 X0 Y0	N24 G03 I-14.25 J0	N38 I22.5 J0
N8 G43 Z10.5 H05 M08	N25 G01 X22.25	N39 X-22.411 Y-1.997 I22.5 J0
N9 G01 Z5.75 F185.687	N26 G03 I-22.25 J0	N40 X-21.702 Y-3.354 I1.992 J.178
N10 G17 X6.25 F371.374	N27 I-22.25 J0	N41 G40 G01 X-13.724 Y-10.026
N11 G03 I-6.25 J0 F742.749	N28 G01 X0	N42 G00 Z11.
N12 G01 X14.25	N29 G00 Z10.5	N43 Z33.
N13 G03 I-14.25 J0	N30 Z33.	
N14 G01 X22.25		N44 (Desbaste2)
N15 G03 I-22.25 J0	N31 (Contorneado1)	N45 X0 Y0
	N32 Z11.	N46 Z8.

N47 G01 Z.25 F185.687
N48 X4.75 F371.374
N49 G03 I-4.75 J0 F742.749
N50 G01 X12.75
N51 G03 I-12.75 J0
N52 G01 X20.75
N53 G03 I-20.75 J0
N54 I-20.75 J0
N55 G01 X0
N56 G00 Z8.
N57 Z2.75
N58 G01 Z0 F185.687
N59 X4.75 F371.374
N60 G03 I-4.75 J0 F742.749
N61 G01 X12.75
N62 G03 I-12.75 J0
N63 G01 X20.75
N64 G03 I-20.75 J0
N65 I-20.75 J0
N66 G01 X0
N67 G00 Z8.

N68 Z33.
N69 (Contorneado2)
N70 Z8.5
N71 G01 Z0 F185.687
N72 G41 D25 X-12.167 Y9.97 F557.062
N73 X-20.187 Y3.349
N74 G03 X-20.905 Y1.997 I1.273 J-
1.542
N75 X-21. Y0 I20.905 J-1.997 F742.749
N76 I21. J0
N77 X-20.905 Y-1.997 I21. J0
N78 X-20.187 Y-3.349 I1.991 J.19
N79 G40 G01 X-12.167 Y-9.97
N80 G00 Z8.5
N81 Z33. M09
N82 G91 G28 Z0
N83 (6MM X 60DEG HSS
CENTERDRILL)
N84 T06 M06
N85 S9605 M03

N86 (Centrador1)
N87 G90 G54 G00 X-30. Y30.
N88 G43 Z33. H06 M08
N89 G82 G98 R11. Z5.247 P1000
F829.493
N90 Y-30.
N91 X30.
N92 Y30.
N93 G80 Z33. M09
N94 G91 G28 Z0
N95 (3.3mm JOBBER DRILL)
N96 T14 M06
N97 S12000 M03

N98 (Broca1)
N99 G90 G54 G00 X-30. Y30.
N100 G43 Z33. H14 M08
N101 G83 G98 R11. Z-.991 Q2.
F1097.28
N102 Y-30.

N103 X30.
N104 Y30.
N105 G80 Z33. M09
N106 G91 G28 Z0
N107 G28 X0 Y0
N108 M30

Código: Base

O0001
N1 G21
N2 (6MM X 60DEG HSS
CENTERDRILL)
N3 G91 G28 X0 Y0 Z0
N4 T06 M06
N5 S9605 M03

N6 (Centrador1)
N7 G90 G54 G00 X31.5 Y20.
N8 G43 Z25. H06 M08
N9 G82 G98 R3. Z-1.5 P1000 F829.493
N10 Y-20.

N11 G80 Z25. M09
N12 G91 G28 Z0
N13 (4.5mm JOBBER DRILL)
N14 T14 M06
N15 S12000 M03
N16 (Broca1)
N17 G90 G54 G00 X31.5 Y20.
N18 G43 Z25. H14 M08
N19 G83 G98 R3. Z-2.851 Q2. F1097.28
N20 Y-20.
N21 G80 Z25. M09
N22 G91 G28 Z0
N23 G28 X0 Y0
N24 M30

Código: Carcasa-Voluta

O0001
N1 G21
N2 (20MM CRB 2FL 38 LOC)
N3 G91 G28 X0 Y0 Z0
N4 T05 M06

N5 S3478 M03
N6 (Desbaste1)
N7 G90 G54 G00 X0 Y0
N8 G43 Z37.622 H05 M08
N9 G01 Z30.872 F256.204
N10 G17 X6.25 F512.408
N11 G03 I-6.25 J0 F1024.816
N12 G01 X14.25
N13 G03 I-14.25 J0
N14 G01 X22.25
N15 G03 I-22.25 J0
N16 X-22.25 I-22.25 J0
N17 X22.25 I22.25 J0
N18 G01 X0 F512.408
N19 G00 Z37.622
N20 Z33.372
N21 G01 Z30.622 F256.204
N22 X6.25 F512.408
N23 G03 I-6.25 J0 F1024.816
N24 G01 X14.25

N25 G03 I-14.25 J0	N43 G03 X-19.844 Y2.493 I1.534 J-1.974	N61 G01 Y-12.25
N26 G01 X22.25	N44 X-20. Y0 I19.844 J-2.493	N62 G03 I0 J12.25
N27 G03 I-22.25 J0	F1138.579	N63 G01 Y-20.25
N28 X-22.25 I-22.25 J0	N45 I20. J0	N64 G03 I0 J20.25
N29 X22.25 I22.25 J0	N46 X-19.844 Y-2.493 I20. J0 F853.935	N65 I0 J20.25
N30 G01 X0 F512.408	N47 X-18.897 Y-4.156 I2.48 J.312	N66 G01 Y0
N31 G00 Z37.622	N48 G40 G01 X-8.63 Y-12.131	N67 G00 Z28.635
N32 Z55.635 M09	N49 G00 Z38.122	N68 Z25.885
N33 G91 G28 Z0	N50 Z55.635 M09	N69 G01 Z23.135 F256.204
N34 (25mm CRB 3FL HGN 1R 38MM LOC)	N51 G91 G28 Z0	N70 Y-4.25 F512.408
N35 T14 M06	N52 (20MM CRB 2FL 38 LOC)	N71 G03 I0 J4.25 F1024.816
N36 S2767 M03	N53 T05 M06	N72 G01 Y-12.25
N37 (Contorneado1)	N54 S3478 M03	N73 G03 I0 J12.25
N38 G90 G54 G00 X0 Y0	N55 (Desbaste2)	N74 G01 Y-20.25
N39 G43 Z38.122 H14 M08	N56 G90 G54 G00 X0 Y0	N75 G03 I0 J20.25
N40 G01 Z30.622 F284.645	N57 G43 Z28.635 H05 M08	N76 I0 J20.25
N41 G41 D34 X-8.63 Y12.131 F853.935	N58 G01 Z23.385 F256.204	N77 G01 Y0
N42 X-18.897 Y4.156	N59 Y-4.25 F512.408	N78 G00 Z28.635
	N60 G03 I0 J4.25 F1024.816	N79 Z55.635
		N80 (Contorneado2)

N81 Z29.135
N82 G01 Z23.135 F256.204
N83 G41 D25 X-11.647 Y9.95 F768.612
N84 X-19.682 Y3.347
N85 G03 X-20.403 Y1.997 I1.27 J-1.545
N86 X-20.5 Y0 I20.403 J-1.997
F1024.816
N87 I20.5 J0
N88 X-20.403 Y-1.997 I20.5 J0
N89 X-19.682 Y-3.347 I1.99 J.195
N90 G40 G01 X-11.647 Y-9.95
N91 G00 Z29.135
N92 Z55.635 M09
N93 G91 G28 Z0
N94 (6MM X 60DEG HSS
CENTERDRILL)
N95 T06 M06
N96 S4123 M03

N97 (Centrador1)
N98 G90 G54 G00 X-30. Y30.
N99 G43 Z55.635 H06 M08
N100 G82 G98 R33.635 Z27.882 P1000
F272.308
N101 Y-30.
N102 X30.
N103 Y30.
N104 G80 Z55.635 M09
N105 G91 G28 Z0
N106 (3.3mm JOBBER DRILL)
N107 T15 M06
N108 S9907 M03

N109 (Broca1)
N110 G90 G54 G00 X-30. Y30.
N111 G43 Z55.635 H15 M08
N112 G83 G98 R33.635 Z23.765 Q2.
F679.483
N113 Y-30.
N114 X30.
N115 Y30.
N116 G80 Z55.635 M09
N117 G91 G28 Z0
N118 (10MM X 90DEG CRB SPOT
DRILL)
N119 T16 M06
N120 S4152 M03

N121 (Centrador2)
N122 G90 G54 G00 X0 Y0
N123 G43 Z55.635 H16 M08
N124 G82 G98 R26.135 Z20.265 P1000
F295.325
N125 G80 Z55.635 M09
N126 G91 G28 Z0
N127 (16.0mm JOBBER DRILL)
N128 T17 M06
N129 S2552 M03

N130 (Broca2)
N131 G90 G54 G00 X0 Y0
N132 G43 Z55.635 H17 M08

N133 G83 G98 R26.135 Z15.462 Q2.
F259.371

N134 G80 Z55.635 M09

N135 G91 G28 Z0

N136 (16MM CRB 2FL 32 LOC)

N137 T04 M06

N138 S4590 M03

N139 (Desbaste3)

N140 G90 G54 G00 X0 Y0

N141 G43 Z25.635 H04 M08

N142 G01 Z20.515 F169.061

N143 X5.7 F338.121

N144 G03 I-5.7 J0 F676.243

N145 G01 X12.1

N146 G03 I-12.1 J0

N147 I-12.1 J0

N148 G01 X0

N149 G00 Z25.635

N150 Z23.015

N151 G01 Z20.265 F169.061

N152 X5.7 F338.121

N153 G03 I-5.7 J0 F676.243

N154 G01 X12.1

N155 G03 I-12.1 J0

N156 I-12.1 J0

N157 G01 X0

N158 G00 Z25.635

N159 Z55.635

N160 (Contorneado3)

N161 Z26.135

N162 G01 Z20.265 F169.061

N163 G41 D24 X-5.042 Y7.731
F507.182

N164 X-11.636 Y2.657

N165 G03 X-12.247 Y1.596 I.976 J-
1.268

N166 X-12.35 Y0 I12.247 J-1.596
F676.243

N167 I12.35 J0

N168 X-12.247 Y-1.596 I12.35 J0

N169 X-11.636 Y-2.657 I1.587 J.207

N170 G40 G01 X-5.042 Y-7.731

N171 G00 Z26.135

N172 Z55.635 M09

N173 G91 G28 Z0

N174 (10MM X 90DEG CRB SPOT
DRILL)

N175 T16 M06

N176 S3000 M03

N177 (Centrador3)

N178 G90 G54 G00 X0 Y0

N179 G43 Z35.635 H16 M08

N180 G81 G99 R35.635 Z14.565 F200.

N181 G80 Z55.635 M09

N182 G91 G28 Z0

N183 (19.0mm JOBBER DRILL)

N184 T18 M06

N185 S1300 M03

N186 (Broca3)

N187 G90 G54 G00 X0 Y0
N188 G43 Z35.635 H18 M08
N189 G83 G99 R35.635 Z4.447 Q10.
F250.
N190 G80 Z55.635 M09
N191 G91 G28 Z0
N192 (6MM X 60DEG HSS
CENTERDRILL)
N193 T06 M06
N194 S4123 M03

N195 (Centrador4)
N196 G90 G54 G00 X-16.765 Y21.
N197 G43 Z64. H06 M08
N198 G82 G98 R42. Z35.701 P1000
F272.308
N199 Y-19.
N200 G80 Z64. M09
N201 G91 G28 Z0
N202 (4.0mm JOBBER DRILL)
N203 T19 M06

N204 S8174 M03

N205 (Broca4)
N206 G90 G54 G00 X-16.765 Y21.
N207 G43 Z64. H19 M08
N208 G83 G98 R42. Z31.241 Q2.
F560.573
N209 Y-19.
N210 G80 Z64. M09
N211 G91 G28 Z0
N212 (10MM X 90DEG CRB SPOT
DRILL)
N213 T16 M06
N214 S4152 M03

N215 (Centrador5)
N216 G90 G54 G00 X17.515 Y-23.674
N217 G43 Z64. H16 M08
N218 G82 G98 R42. Z35.175 P1000
F295.325
N219 G80 Z64. M09

N220 G91 G28 Z0
N221 (8.5mm JOBBER DRILL)
N222 T20 M06
N223 S4063 M03

N224 (Broca5)
N225 G90 G54 G00 X17.515 Y-23.674
N226 G43 Z64. H20 M08
N227 G83 G98 R42. Z25. Q2. F340.599
N228 G80 Z64. M09
N229 G91 G28 Z0
N230 (6MM CRB 2FL 19 LOC)
N231 T01 M06
N232 S12000 M03

N233 (Contorneado4)
N234 G90 G54 G00 X17.515 Y-23.674
N235 G43 Z42. H01 M08
N236 G01 Z32. F125.
N237 G41 D21 X20.313 Y-23.674
F731.52

N238 G03 X20.413 Y-23.57 I0 J.1
N239 Y-23.777 I-2.898 J-.104 F500.
N240 X20.313 Y-23.674 I-.1 J.004
N241 G40 G01 X17.515 F731.52
N242 G00 Z42.
N243 Z64.
N244 Z42.
N245 G01 Z36.6 F125.
N246 G41 D21 X20.415 Y-23.674
F731.52
N247 G03 I-2.9 J0 F1463.04
N248 G40 G01 X17.515 F731.52
N249 G00 Z42.
N250 Z39.6
N251 G01 Z34.3 F125.
N252 G41 D21 X20.415 Y-23.674
F731.52
N253 G03 I-2.9 J0 F1463.04
N254 G40 G01 X17.515 F731.52
N255 G00 Z42.
N256 Z64. M09

N257 G91 G28 Z0
N258 (5MM HSS 90DEG
COUNTERSINK)
N259 T11 M06
N260 S7800 M03

N261 (Contorneado5)
N262 G90 G54 G00 X17.515 Y-23.674
N263 G43 Z42. H11 M08
N264 G01 Z37.6 F125.
N265 G41 D31 X21.238 Y-25.299
F673.649
N266 X22.208 Y-24.51
N267 G03 X22.389 Y-24.173 I-.316
J.388
N268 X22.415 Y-23.674 I-4.875 J.499
F1347.298
N269 I-4.9 J0
N270 X22.389 Y-23.175 I-4.9 J0
F673.649
N271 X22.208 Y-22.838 I-.497 J-.051

N272 G40 G01 X21.238 Y-22.048
N273 X17.515 Y-23.674
N274 G00 Z42.
N275 Z64. M09
N276 G91 G28 Z0
N277 (10MM HSS 90DEG
COUNTERSINK)
N278 T21 M06
N279 S2813 M03

N280 (Avellanador1)
N281 G90 G54 G00 X17.515 Y-23.674
N282 G43 Z64. H21 M08
N283 G82 G98 R42. Z34.6 P1000
F257.276
N284 G80 Z64. M09
N285 G91 G28 Z0
N286 G28 X0 Y0
N287 M30

Tabla C.1 Ciclo de fabricación de la carcasa

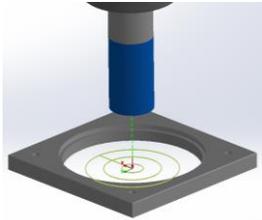
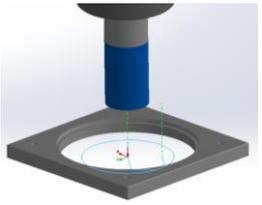
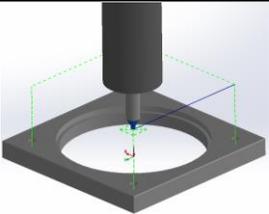
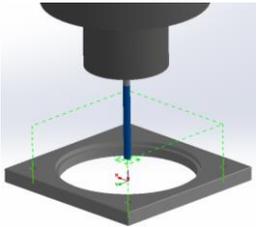
Ciclo de fabricación: Carcasa									
#	Operación	Esquema representativo	Herramienta	Metrología	Vc [m/min]	N [rpm]	f [m/rev]	Tf [min]	Ttotal
1	Desbaste		T05- 20 plana	Calibrador reloj comparador	2.54	3322.96	8440.32	2.36	2.36
2	Contorneado		T05- 20 plana	Calibrador	2.54	3322.96	8440.32	0.6	0.6
3	Centrador		T06 - 6mm x 60DEG	Calibrador	0	9605.06	0	0.47	0.47
4	Broca		T14 - 3.3x118.00" Broca	Calibrador	0	12000	0	0.48	0.48
								Total	3.91

Tabla C.2 Ciclo de fabricación de la base

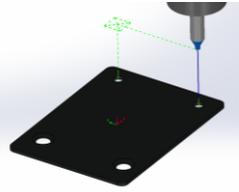
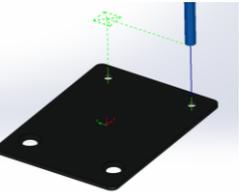
Ciclo de fabricación: Base									
#	Operación	Esquema representativo	Herramienta	Metrología	Vc [m/min]	N [rpm]	f [m/rev]	Tf [min]	Ttotal
1	Broca 1		T06 - 60DEG	Calibrador	2.54	9605.06	24396.85	0.2	0.2
2	Broca 2		T14 - 4.5 x 118°	Calibrador	2.54	12000	30480.00	0.14	0.14
								Total	0.34

Tabla C.3 Ciclo de fabricación de la carcasa-voluta

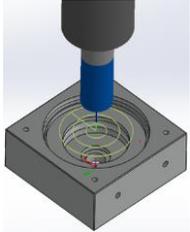
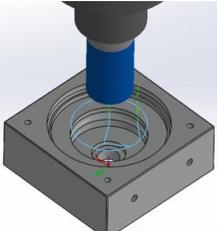
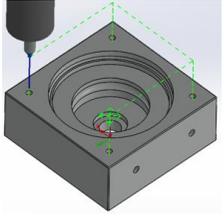
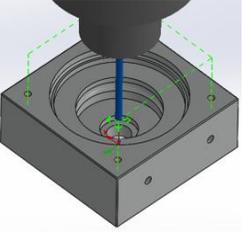
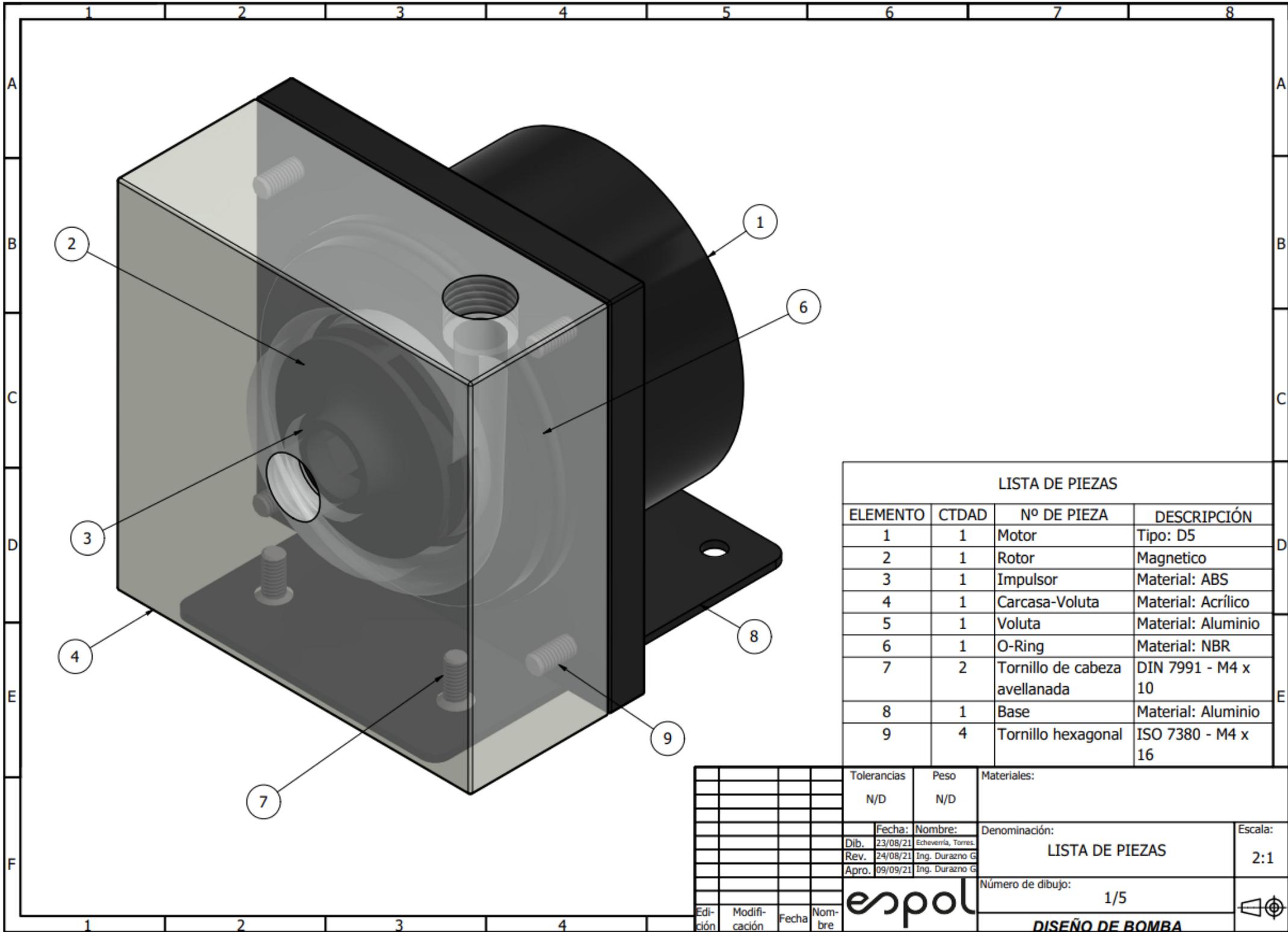
Ciclo de fabricación: Carcasa-Voluta									
#	Operación	Esquema representativo	Herramienta	Metrología	Vc [m/min]	N [rpm]	f [m/rev]	Tf [min]	Ttotal
1	Desbaste		T05- 20 plana	Calibrador reloj comparador	2.54	3478.2	8834.63	1.91	1.91
2	Contorneado		T14- 25x1 Torica	Calibrador	2.54	2767.03	7028.26	0.45	0.45
3	Centrador		T06 - 6mm x 60DEG	Calibrador	0	4123.39	0	0.22	0.22
4	Broca		T14 - 3.3x118.00" Broca	Calibrador	0	9907.89	0	0.52	0.52
Total									3.1

Tabla C.4 Tabla del proceso de fabricación

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
CAMPO AVANZADO DE MECANIZACIÓN Y PROTOTIPOS

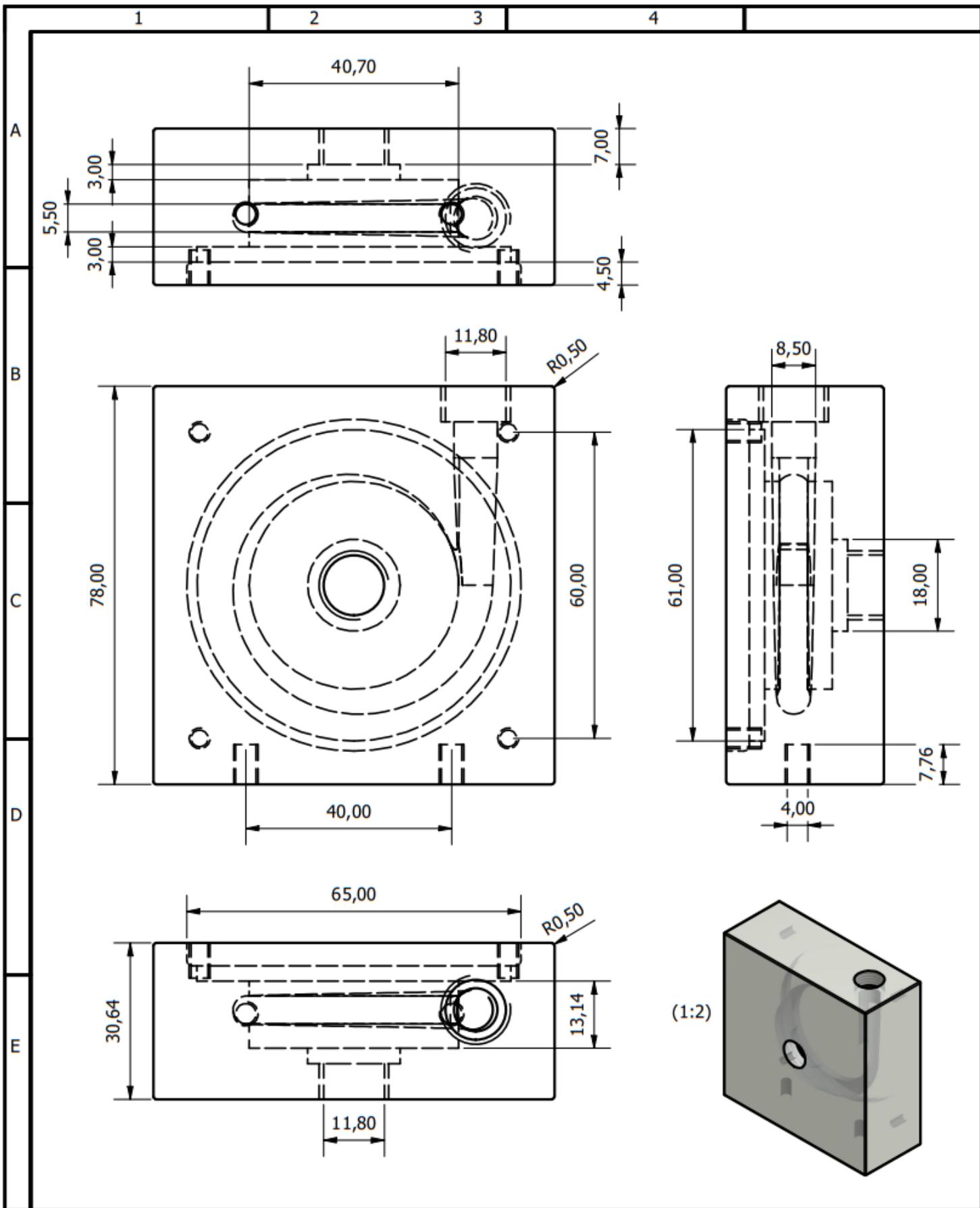
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL CAMPO AVANZADO DE MECANIZACIÓN Y PROTOTIPOS															
DISEÑADORES:		Samir Alexander Echeverria Veas, Carlos Fernando Torres Mazón						Revisado por:							
SISTEMA:		Bomba						Fecha de impresión:							
								Fecha de entrega:							
ESQUEMA Y ORIENTACIÓN DE LA IMPRESIÓN							DIMENSIONES DE LA PIEZA								
							Dirección de deposición		Eje Z		Escala	1:1			
							Dimensión en x		37.016	[mm]	Proporción en x	0.12			
							Dimensión en y		37.0055	[mm]	Proporción en y	0.2			
							Dimensión en z		11.665	[mm]	Proporción en z	0.06			
							Ángulo de inclinación		0		[°]				
CÓDIGO	ELEMENTO	CANTIDAD	TIPO DE IMPRESIÓN	MÁQUINA			PROCESO	PARÁMETROS			TIEMPO				
1	Impulsor	1	Material jetting (MJ)	ProJet MJP 3510 SD	Resolución		32	[μm]	Preparación		Temperatura del material adición	90	[°C]	3.53	H
					Espacio de impresión		298x185x203	[mm]	Impresión		Temperatura del material soporte	90	[°C]		
					Volumen de impresión		4162	[mm3]	Material de adherencia		NO APLICADO				
					Peso del material de adición		0.004744	[Kg]	Peso del material de soporte		0.008495	[Kg]			
					Precisión por mm		[0,025-0,05]	[mm]	Primera capa		Cera				
					Velocidad vertical		5	[mm/h]	Patrón		Lineal				
					Relleno		100	[%]	Post Proceso		Material		Aceite		
					Máquina		CAMPRO FINISHER								
					Herramienta		NO APLICADO								
					Certificación		CE								
TIEMPO TOTAL DE IMPRESIÓN:											3.53	H			

APÉNDICE D
PLANOS

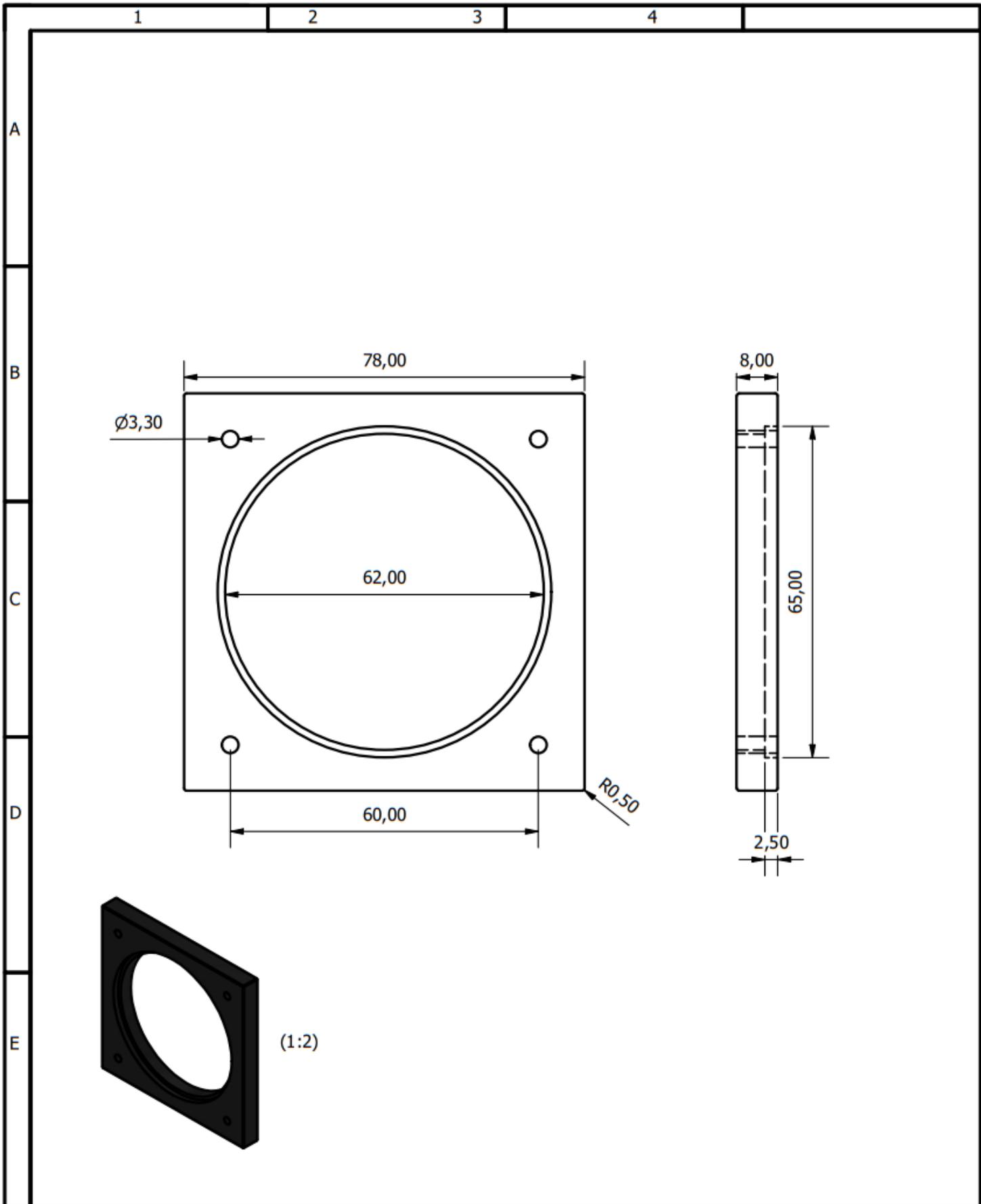


LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Motor	Tipo: D5
2	1	Rotor	Magnetico
3	1	Impulsor	Material: ABS
4	1	Carcasa-Voluta	Material: Acrílico
5	1	Voluta	Material: Aluminio
6	1	O-Ring	Material: NBR
7	2	Tornillo de cabeza avellanada	DIN 7991 - M4 x 10
8	1	Base	Material: Aluminio
9	4	Tornillo hexagonal	ISO 7380 - M4 x 16

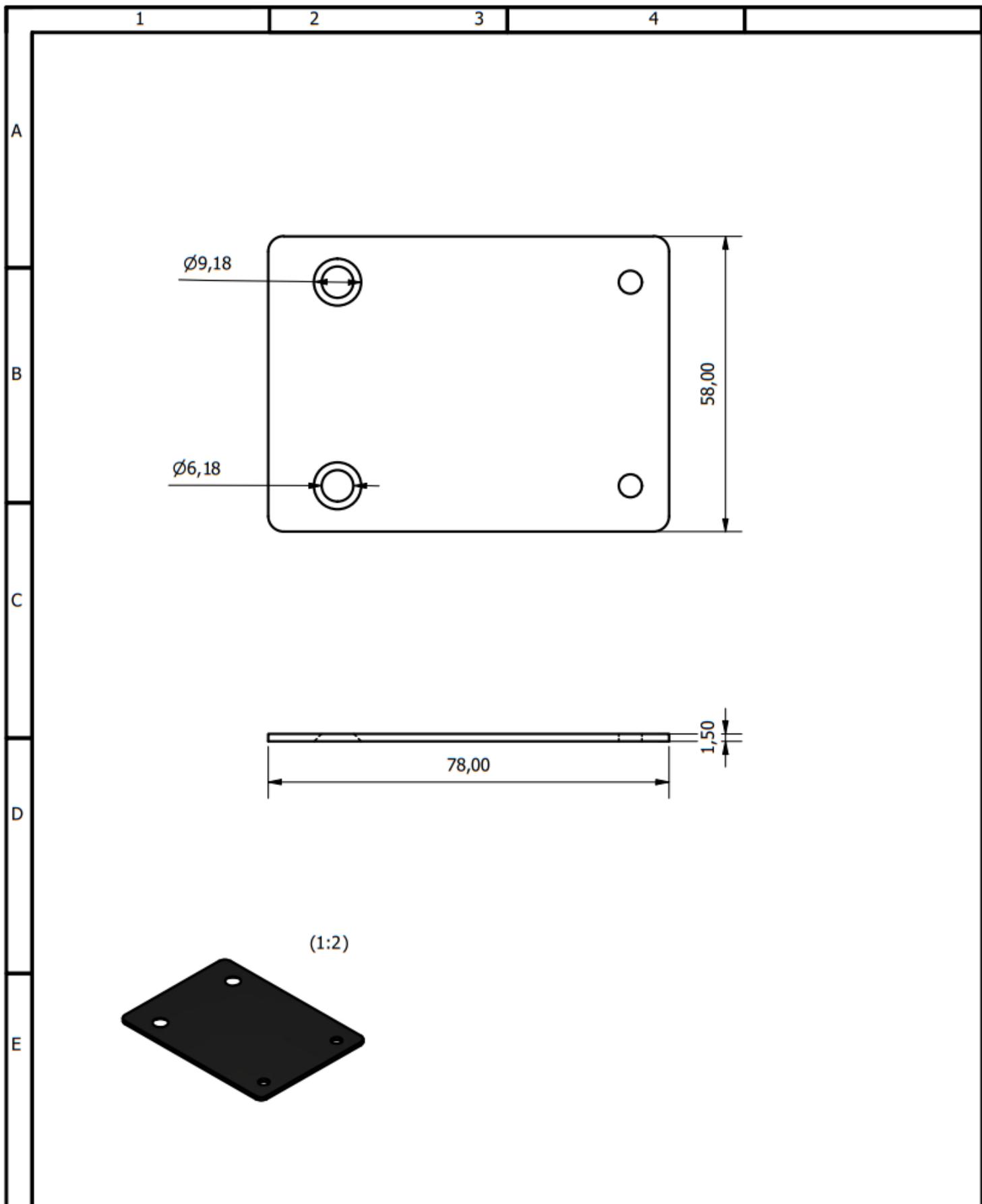
Tolerancias		Peso		Materiales:	
N/D		N/D			
Fecha:		Nombre:		Denominación:	
Dib. 23/08/21		Echeverría, Torres		LISTA DE PIEZAS	
Rev. 24/08/21		Ing. Durazno G		Escala:	
Apro. 09/09/21		Ing. Durazno G		2:1	
Número de dibujo:				1/5	
					
DISEÑO DE BOMBA					



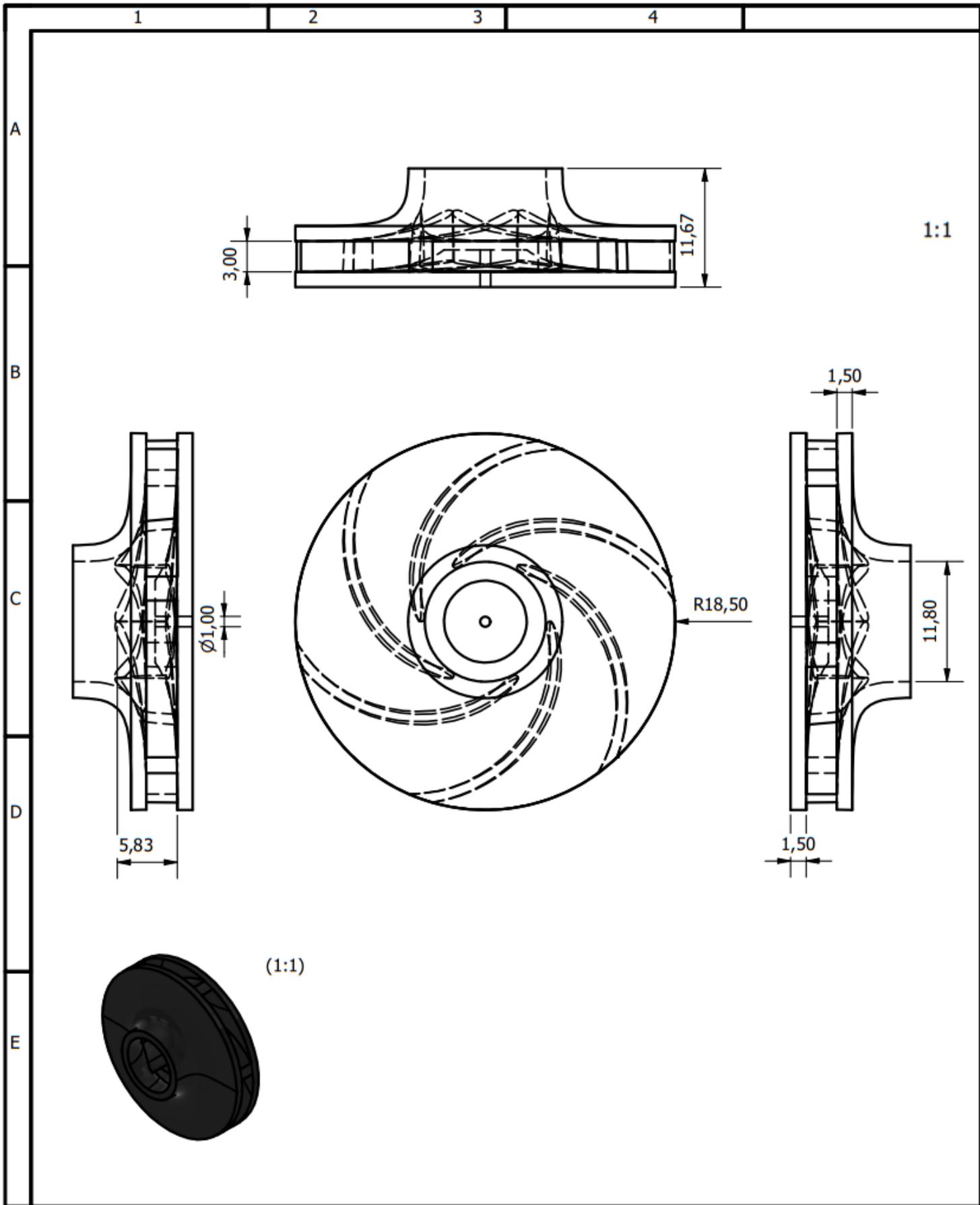
				Tolerancias	Peso	Materiales:	
				N/D	N/D		
				Fecha:	Nombre:	Denominación:	Escala:
				Dib. 23/08/21	Echeverría, Torres,	CARCASA - VOLUTA	1:1
				Rev. 24/08/21	Ing. Durazno G		
				Apro. 09/09/21	Ing. Durazno G		
						Número:	
						2/5	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			DISEÑO DE BOMBA	



				Tolerancias	Peso	Materiales:	
				N/D	N/D		
				Fecha:	Nombre:	Denominación:	Escala:
				Dib. 23/08/21	Echeverría, Torres.		
				Rev. 24/08/21	Ing. Durazno G		
				Apro. 09/09/21	Ing. Durazno G	Número:	1:1
							
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			DISEÑO DE BOMBA	



				Tolerancias	Peso	Materiales:	
				N/D	N/D		
				Fecha:	Nombre:	Denominación:	Escala:
			Dib.	23/08/21	Echeverría, Torres.		
			Rev.	24/08/21	Ing. Durazno G		
			Apro.	09/09/21	Ing. Durazno G		
						Número:	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			4/5	
						DISEÑO DE BOMBA	



				Tolerancias	Peso	Materiales:	
				N/D	N/D		
				Fecha:	Nombre:	Denominación:	Escala:
				Dib. 23/08/21	Echeverría, Torres.	IMPULSOR	2:1
				Rev. 24/08/21	Ing. Durazno G		
				Apro. 09/09/21	Ing. Durazno G		
						Número:	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			5/5	
						DISEÑO DE BOMBA	