



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA**

DIRECCIÓN DE POSGRADOS

**MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDOS POR
COMPUTADOR, PRIMERA PROMOCIÓN CICLO 2014-2016**

**TEMA: “FABRICACIÓN DE UN PROTOTIPO DE IMPULSOR
DE UNA BOMBA CENTRIFUGA DEL ÁREA ELPO PLANTA DE
PINTURA DE LA EMPRESA ENSAMBLADORA CIAUTO.”**

AUTOR: ING. CHOTO CHARIGUAMAN, LUIS SANTIAGO

DIRECTOR: ING. CULQUI, BORYS MSC

SANGOLQUÍ-ECUADOR

2017



DEPARTAMENTO DE POSGRADO

MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDOS POR COMPUTADOR

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “FABRICACIÓN DE UN PROTOTIPO DE IMPULSOR DE UNA BOMBA CENTRIFUGA DEL ÁREA ELPO PLANTA DE PINTURA DE LA EMPRESA ENSAMBLADORA CIAUTO.” realizado por el Ing. LUIS SANTIAGO CHOTO CHARIGUAMAN, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por las Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo ya autorizar al Ing. LUIS SANTIAGO CHOTO CHARIGUAMAN para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 21 de Septiembre de 2017



.....
ING. CULQUI CULQUI BORYS HERNAN MSC.
DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE POSGRADO

MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDOS POR COMPUTADOR

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Ing. LUIS SANTIAGO CHOTO CHARIGUAMAN** con cédula de identidad No. 060377216-1 declaro que este trabajo de titulación, **“FABRICACIÓN DE UN PROTOTIPO DE IMPULSOR DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA DEL ÁREA ELPO PLANTA DE PINTURA DE LA EMPRESA ENSAMBLADORA CIAUTO.”** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 21 de Septiembre de 2017

Ing. LUIS SANTIAGO CHOTO CHARIGUAMAN

CI: 060377216-1



DEPARTAMENTO DE POSGRADO

MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDOS POR COMPUTADOR

AUTORIZACIÓN

Yo, **Ing. LUIS SANTIAGO CHOTO CHARIGUAMAN**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución el presente trabajo de titulación , **“FABRICACIÓN DE UN PROTOTIPO DE IMPULSOR DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA DEL ÁREA ELPO PLANTA DE PINTURA DE LA EMPRESA ENSAMBLADORA CIAUTO.”** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 21 de Septiembre de 2017

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Luis Choto', is written over a horizontal line. The signature is stylized and cursive.

Ing. LUIS SANTIAGO CHOTO CHARIGUAMAN

CI: 060377216-1



DEDICATORIA

Dedico de manera especial a mis padres que siempre han sido mi principal cimiento para la construcción de mi vida profesional, a las personas que estuvieron en los momentos más difíciles y de alguna manera se mantuvieron junto a mí, representando una parte fundamental para la culminación de una meta más en mi vida profesional, a mi familia quien con su ejemplo de responsabilidad y deseos de superación me brindaron el apoyo moral para superar cada obstáculo que se me presentaron cada día.

Luis Santiago Choto Chariguamán



AGRADECIMIENTO

En primer lugar quiero dar gracias a Dios, quien con su infinita bondad me permitió seguir y conseguir uno de mis propósitos en mi vida profesional, agradezco por tener una familia quienes con sus consejos y sabias palabras supieron aconsejarme para el mi bienestar y alcance de metas.

A mi Director de trabajo de titulación por brindarme su apoyo y conocimientos para la realización del presente proyecto. Infinitamente a todos mis maestros y compañeros de maestría por compartir sus conocimientos, formar parte de este proyecto, de mi formación personal y profesional.

Gracias a todos ustedes.

Luis Santiago Choto Chariguamán

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
INDICE DE TABLAS	xi
INDICE DE FIGURAS	xiii
RESUMEN	xv
ABSTRACT	xvi
1 CAPÍTULO I	1
ESTADO DEL ARTE	1
1.1 Problema.	1
1.1.1 Desarrollo del problema.....	1
1.1.2 Planteamiento del problema.....	2
1.1.3 Formulación del problema	2
1.2 Justificación e Importancia	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo general.....	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
2 CAPÍTULO II	4
MARCO TEÓRICO	4
2.1 Fundamentación teórica	4
2.1.1 Prototipo.....	4
2.1.2 CAD/ CAE/CAM.....	4
2.1.2.1 Definición de CAD	4
2.1.2.2 Objetivo del CAD	5
2.1.2.3 Definición de CAE.....	6
2.1.2.4 Definición de CAM.....	6

2.1.3	Ingeniería inversa.....	7
2.1.3.1	Escáner 3D.....	8
2.1.4	Bombas centrífugas.....	9
2.1.4.1	Clasificación de bombas centrífugas	9
2.1.5	Manufactura	11
2.1.6	Proceso de manufactura para la producción de impulsores	12
2.1.6.1	Método de colada en arena (fundición).	13
2.1.6.2	Proceso de mecanizado para la producción de impulsores.....	13
2.1.6.3	Procedimiento de unión.	14
2.1.6.4	Impresión o prototipado rápido 3D.....	15
2.1.6.5	Materiales para impresoras 3D	15
3	CAPÍTULO III.....	17
	DISEÑO DEL IMPULSOR.....	17
3.1	Determinar las variables que intervienen en el diseño mecánico del Impulsor.	17
3.2	Obtención de la geometría del impulsor	17
3.3	Escaneado del impulsor.	19
3.3.1	Preparación de la superficie del impulsor.....	19
3.3.2	Escaneado y exportación.....	20
3.3.3	Tratamiento de la nube de puntos	21
3.4	Modelado del Impulsor	21
3.4.1	Evaluación de la geometría del impulsor.....	22
3.4.2	Reconstrucción del impulsor en Solidworks.....	23
3.5	Selección de materiales alternativos para el impulsor.	24
3.5.1	Análisis Químico.	24
3.5.2	Ensayo de dureza Brinell.	25
3.5.3	Causas que deterioran el impulsor.	26
3.5.4	Criterio de selección de materiales.	27
3.5.4.1	Función del impulsor.	28
3.5.4.2	Condiciones a optimizar:	28
3.5.4.3	Objetivo.	28
3.5.5	Primera aproximación.....	28
3.5.6	Segunda aproximación.....	29

3.6	Análisis y simulación por Ingeniería Asistida por Computador (CAE).	32
3.6.1	Simulación del impulsor CAE.	35
4	CAPÍTULO IV	37
	MANUFACTURA DEL IMPULSOR	37
4.1	Manufactura del prototipo conceptual.	37
4.1.1	Diferencias entre los materiales de impresión ABS vs PLA.	38
4.2	Proceso de Manufactura del prototipo funcional.	39
4.2.1	Fundición.	39
4.2.1.1	Fabricación del molde exterior.	39
4.2.1.2	Fabricación del Núcleo (Macho).	41
4.2.2	Sistema de alimentación.	43
4.2.2.1	Cálculo de las alturas del canal de alimentación.	43
4.2.2.2	Cálculo del tiempo de vaciado.....	44
4.2.2.3	Cálculo de áreas de la canal de alimentación.....	45
4.2.2.4	Cálculo del área de alimentación o de control.	47
4.2.2.5	Cálculo de la mazarota.	50
4.2.3	Moldeo y colado.	51
4.3	Limpieza y desbaste de la pieza fundida.....	52
4.4	Torneado CNC.	52
4.4.1.1	Cálculos de los parámetros de corte.....	53
4.4.1.2	Simulación del mecanizado CAM (Torno).....	56
4.5	Fresado.....	57
4.5.1	Cálculos de los parámetros de corte.....	57
4.5.2	Simulación mecanizado.	60
5	CAPÍTULO V	62
	VALIDACIÓN DE RESULTADOS DEL PROTOTIPO	62
5.1	Ensayo de materiales.....	62
5.1.1	Ensayo químico para el A206.0 T7.....	63
5.1.2	Ensayo de dureza Brinell para el A206.0 T7.	64
5.2	Evaluación de Dimensiones lineales.....	65
5.3	Evaluación de vibraciones.	66
5.3.1	Ensayo de vibración.....	68

5.4	Prueba de funcionamiento del Impulsor.	72
5.4.1	Análisis hidráulico.	73
5.4.1.1	Cálculo de parámetros de la bomba.	74
5.5	Costos.....	78
5.5.1	Costos del desarrollo del producto.....	78
5.5.1.1	Costos de Investigación.	79
5.5.1.2	Costos del molde.....	79
5.5.1.3	Costos de mano de obra.	80
5.5.1.4	Costos de materiales	80
5.5.1.5	Costos de Equipos y máquinas para ensayos y operaciones.....	81
5.5.1.6	Total de costos y tiempos en el desarrollo del prototipo.	81
5.5.2	Costo de Producción.	82
6	CAPÍTULO VI.....	84
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	84
6.1	Conclusiones	84
6.2	Recomendaciones.	85
	REFERENCIAS.....	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Exigencias y tendencias de la manufactura.....	12
Tabla 2 Variables de rendimiento de la bomba.....	17
Tabla 3 Características de los equipos y softwares que se utilizaran para Diseño asistido por computador (CAD)	18
Tabla 4 Datos de análisis con espectrómetro	24
Tabla 5 Primera aproximación materiales para impulsor.....	30
Tabla 6 Tercera aproximación lista de materiales para impulsor.	31
Tabla 7 Selección de material de acuerdo a sus características.	32
Tabla 8 Parámetros para el factor de seguridad A, B y C.	33
Tabla 9 Parámetros para el factor de seguridad E y D.	34
Tabla 10 Datos del factor de seguridad y del análisis estructural –Von Mises.....	36
Tabla 11 Propiedades mecánicas del material ABS y PLA.	38
Tabla 12 Contracción o dilatación volumétrica por solidificación para diversos metales fundidos.	40
Tabla 13 Coeficientes de corrección.	45
Tabla 14 Coeficientes de Velocidad de colado.	45
Tabla 15 Relaciones de colado.....	46
Tabla 16 Dimensiones normalizadas de canales distribución.....	48
Tabla 17 Dimensiones normalizadas de canales alimentación.	49
Tabla 18 Parámetros de corte por pieza en el torno.	56
Tabla 19 Parámetros de corte por pieza en la fresa.	60
Tabla 20 Análisis y pruebas del prototipo.....	62
Tabla 21 Composición química del Aluminio A206.0 T7.....	63
Tabla 22 Datos de ensayo y datos técnicos del A206.0T7.....	64
Tabla 23 Evaluación dimensional del impulsor.	65
Tabla 24 Límites de clase de vibración.	70
Tabla 25 Comparación de datos de trabajo entre el impulsor original y el prototipo.	73
Tabla 26 Valores de factores de tolerancia.	74
Tabla 27 Análisis de datos del impulsor (nominal y real) con los datos de garantía (fabricante).....	75

Tabla 28 Tolerancia del caudal entre los datos de garantía y los calculados del prototipo	77
Tabla 29 Desviación de la altura entre los datos de garantía y los calculados del prototipo.....	78
Tabla 30 Costos de investigación.....	79
Tabla 31 Costos del molde.....	79
Tabla 32 Costos de mano de obra	80
Tabla 33 Costos de materia prima.....	80
Tabla 34 Costos de Equipos y máquinas para ensayos y operaciones.....	81
Tabla 35 Total de costos y tiempos en el desarrollo del prototipo.....	82
Tabla 36 Costos de producción.....	82
Tabla 37 Costos entre producto importado y el prototipo.....	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Dibujo o Diseño de un sólido asistido por computador CAD.	5
Figura 2 Simulación asistido por computador CAE.	6
Figura 3 Manufactura asistida por computador CAM.	7
Figura 4 Proceso de la ingeniería inversa.	7
Figura 5 Escáner HandyScan.	8
Figura 6 Tratamiento de la nube de puntos.	8
Figura 7 Bomba Centrífuga.	9
Figura 8 Tipo de Bombas Centrífugas.	10
Figura 9 Impulsor abierto o semicerrado.	10
Figura 10 Impulsor cerrado.	11
Figura 11 Cavidad de una pieza para colado en arena.	13
Figura 12 Mecanizado de un impulsor abierto.	14
Figura 13 Procedimiento por unión mediante tornillos.	15
Figura 14 Impresora 3D.	16
Figura 15 Rodete preparado para ser escaneada.	19
Figura 16 Nube de puntos del impulsor escaneado.	20
Figura 17 Tratamiento de malla.	21
Figura 18 Creación del croquis.	22
Figura 19 Evaluación de la geometría.	22
Figura 20 Transferencia del sólido de Geomagic design a Solidworks.	23
Figura 21 Prototipo del impulsor en Solidworks.	23
Figura 22 microestructura del material del impulsor original.	25
Figura 23 Rodete deteriorado por el desgaste.	26
Figura 24 Temperatura vs Presión.	27
Figura 25 Dureza vs Limite de elasticidad.	29
Figura 26 Dureza vs Costo.	30
Figura 27 FOS Y Von mises stress, Hierro fundido, austenítico (nodular), EN GJSA XNiCr20 2.	35
Figura 28 FOS y Von mises stress, Aluminio A 206.0. T7.	36
Figura 29 FOS y Von mises stress, Acero inoxidable ASTM CA-6NM, fundido.	36

Figura 30 Procesos y operaciones que intervienen en la fabricación del prototipo.....	37
Figura 31 Prototipos impresos. (a) escala 1:2 con PLA. (b) escala 1:1 con ABS	38
Figura 32 Bosquejo del molde externo.....	40
Figura 33 Molde externo.....	41
Figura 34 Molde del núcleo (macho).....	42
Figura 35 Elaboración del núcleo.....	42
Figura 36 Esquemas de caja con molde para fundición.....	43
Figura 37 Canal de alimentación.....	46
Figura 38 Sección de canales de alimentación (ataque), distribución (colada)	48
Figura 39 Forma cilíndrica de la mazarota.....	51
Figura 40 Proceso de fundición: a) moldeo de la cavidad externa, b) ubicación del núcleo, c) fusión del aluminio, d) producto en bruto del impulsor.....	52
Figura 41 Simulación de torneado (CAM).....	56
Figura 42 Torneado del impulsor.....	57
Figura 43 Simulación del perfilado.....	60
Figura 44 Simulación del acabado.....	61
Figura 45 Fresado del impulsor.....	61
Figura 46 a) Peso Nominal, b) Peso Real.....	67
Figura 47 Comprobación del equipo y máquina herramienta.....	69
Figura 48 Amplitud vs frecuencia.....	69
Figura 49 Ensayo de vibración con el impulsor.....	71
Figura 50 Amplitud y frecuencia del rodete.....	71
Figura 51 Circuito de flujo de bombeo.....	72
Figura 52 Curvas altura vs caudal, entre datos de garantía (fabricante) y datos del impulsor real (prototipo)	77

RESUMEN

El procedimiento de manufactura del prototipo de impulsor depende principalmente de las tipologías físicas, instalaciones viables y especificaciones deseadas del producto, sin descartar los parámetros de tiempo y costo que son importantes en el procedimiento de planificación de cada producto. El impulsor se caracteriza como la parte principal de funcionamiento de la bomba centrífuga, que va depender para ello de su forma y la aplicación de trabajo. La manufactura es complicada del prototipo por ser un impulsor cerrado, se ha visto necesario hacer uso de la tecnología de equipos y máquinas para su desarrollo, para llegar al modelo ideal del impulsor, se planteó en el proyecto de tesis los siguientes objetivos: A) Utilizar el método de ingeniería inversa haciendo uso de un escáner e impresora 3D apoyados con el método CAD/CAE / CAM y considerando las cuestiones de tiempo y costo. B) La selección de los materiales y el proceso de fabricación se realizó en base al estudio del material original, detectando que el problema del deterioro de la pieza fue causada por erosión - cavitación, y que para contrarrestar este fenómeno se debe mejorar la dureza del material. C) El análisis de la prueba hidráulica de la bomba demuestra el grado de conformidad entre el prototipo de impulsor fabricado inversamente y el impulsor original. Se han estudiado los parámetros que incluyen la cabeza (H) y el caudal (Q) en el caso de impulsor fabricado.

PALABRAS CLAVE:

- **PROTOTIPO**
- **IMPULSOR.**
- **CAD.**
- **CAE.**
- **CAM.**

ABSTRACT

The manufacturing process of the impeller prototype depends mainly on the physical typologies, feasible installations and desired product specifications, without ruling out the time and cost parameters that are important in the planning process of each product. The impeller is characterized as the main part for the centrifugal pump operation which depends on its form and application of work. The manufacture is complicated of the prototype, being a closed impeller, it has been necessary to make use of the technology of equipment and machines for its development, to reach the ideal model of the impeller, in this thesis project the following objectives were proposed: A) Use the reverse engineering method using a 3D printer and scanner supported by the CAD / CAE / CAM method and considering time and cost issues. B) The selection of the materials and the manufacturing process was made based on the study of the original material, detecting that the problem of the deterioration of the piece was caused by erosion-cavitation, and that to counteract this phenomenon the hardness of the material had to be improved. C) The analysis of the hydraulic test of the pump demonstrates the degree of conformity between the prototypes of the inverse manufactured impeller and the original impeller. Parameters including head (H) and flow (Q) in the case of impeller manufactured have been studied.

KEYWORDS:

- **PROTOTYPE.**
- **IMPELLER.**
- **CAD.**
- **CAE.**
- **CAM.**

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE

1.1 Problema.

A medida del tiempo y el desarrollo en la parte industrial del país y del mundo se han presentado un sin número de dificultades para conseguir equipos (máquinas) o sus partes (repuestos).

1.1.1 Desarrollo del problema.

EL avance de la ciencia y la tecnología lleva a una organización a utilizar más equipos tales como bombas con algunas nuevas características en su industria. De hecho, la bomba es una máquina que se utilizan para transferir el fluido de uno a otro nivel. Los mecanismos de la mayoría de las bombas son similares entre sí, transforman la energía cinética a la energía dinámica del fluido facilitando la transferencia del flujo.

Las manufacturas de bombas han tenido un progreso significativo en las últimas décadas. Debido a las necesidades urgentes de la industria, todavía existe una gran cantidad de inversión en este sector que en última instancia, conduce a la mejora en el diseño y la fabricación de este producto específico.

Comúnmente, los fabricantes de bombas han estado involucrados con muchos desafíos, no sólo en la fase de diseño, sino también en la fabricación, prueba y error. En el mundo los fabricantes de bombas están buscando las tecnologías y enfoques para reducir los costos de fabricación y el tiempo, así como mejora la calidad. En este sentido, muchos de los fabricantes de este sector han destacado los paradigmas de la ingeniería inversa y la reingeniería.

1.1.2 Planteamiento del problema

En la empresa ecuatoriana ensambladora de vehículos automotores CIAUTO, existe la problemática en torno a la bomba centrífuga del área ELPO de la planta de pintura, específicamente en el impulsor que es una pieza principal, debido a que este presenta un desgaste prematuro por encontrarse en contacto con (aguas alcalinas) que se utilizan en esta área, causando de esta manera problemas en el retraso de la producción planificada.

La falta de tecnología que existe en el medio para la manufactura, el costo de materiales y la falta vinculación de la academia con la industria; son algunos de factores que no han hecho posible la fabricación de este tipo de piezas para su debido reemplazo.

1.1.3 Formulación del problema

¿Cómo influye la fabricación de un prototipo de impulsor de la bomba centrífuga del área ELPO de la planta de pintura en la empresa ensambladora CIAUTO?

1.2 Justificación e Importancia

En el área ELPO de pintura de la empresa ensambladora CIAUTO, se tiene el problema de desgaste del impulsor de la bomba centrífuga, la que se encarga de la circulación del fluido.

Es por ello que se ha visto la necesidad de manufacturar un prototipo de impulsor, que permita ser reemplazado de forma rápida, sencilla y a bajo costo, para de esta manera lograr una producción sin paralizar los procesos debido a inconvenientes en su maquinaria.

El presente proyecto será de gran interés para la empresa ensambladora CIAUTO, ya que se contribuirá a mitigar el problema que se presenta en la bomba centrífuga del área de pintura, coadyuvando a la mejora de los procesos que se llevan a

cabo en ésta, y proporcionando una herramienta de solución que puede ser adaptada en otro problema que se presente en cualquier área de la organización.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Fabricar un prototipo de impulsor de una bomba centrífuga del área ELPO planta de pintura de la empresa ensambladora CIAUTO.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar las variables que intervienen en el diseño mecánico del impulsor.
- Obtener la geometría del impulsor mediante:
 - Software CAD “Diseño Asistido por Computador”.
 - Ingeniería inversa (Escáner tridimensional).
- Selección de materiales alternativos para el impulsor.
- Simulación y validación del impulsor con la ayuda de software CAE
- Mecanizado del impulsor. Mediante software CAM “Manufactura asistida por computador”.
- Pruebas de funcionamiento.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Fundamentación teórica

2.1.1 Prototipo

Según (Cardenas, Orozco, Pérez, & Pineda, 2011, p. 14) prototipo “es la representación inicial del diseño de un producto que permite dar validez a creaciones preliminares experimentando con varios elementos o diferentes diseños. Es una implementación parcial para ir realizando comprobaciones a lo largo de su diseño.”

Según (Universia, 2015) prototipo “es una simulación del producto final. Es como una maqueta interactiva cuyo objetivo principal es probar si el flujo de interacciones es el correcto”

De acuerdo a las definiciones citadas, se puede concluir que prototipo es una representación o simulación de un producto, cuya finalidad es dar una validez preliminar a un producto final.

2.1.2 CAD/ CAE/CAM.

El diseño y fabricación asistida por computador se ha convertido en una herramienta de soporte en la fabricación de cualquier producto, actualmente en la industria se ha convertido en requisito indispensable, debido a que tiene la necesidad de mejorar la calidad, disminuir costes y acortar los tiempos de producción en sus trabajos. El uso de estas herramientas ha dado lugar a la aparición de tecnologías que implican el uso de ordenadores para el diseño y fabricación de productos.

2.1.2.1 Definición de CAD

Según (Cardenas, Orozco, Pérez, & Pineda, 2011, p. 15), CAD “significa Diseño Asistido por computador, el mismo que es un sistema informático que sirve

para realizar tareas como el dibujo técnico o diseño, dando soporte a los dibujantes, proyectistas, diseñadores e ingenieros”

Según (Sanchez, 2014, p. 273) “es asistir al diseñador en su tarea específica, como el dibujo técnico y la documentación del mismo, pero normalmente permite realizar otras tarea complementarias, relacionada principalmente con la presentación y el análisis del diseño realizado.”

En virtud de las definiciones citadas anteriormente, se puede llegar a la conclusión que CAD es diseño o dibujo asistido por computador, siendo un software que permite realizar estas tareas, tales como el diseño de un prototipo, como se ilustra en la figura 1.

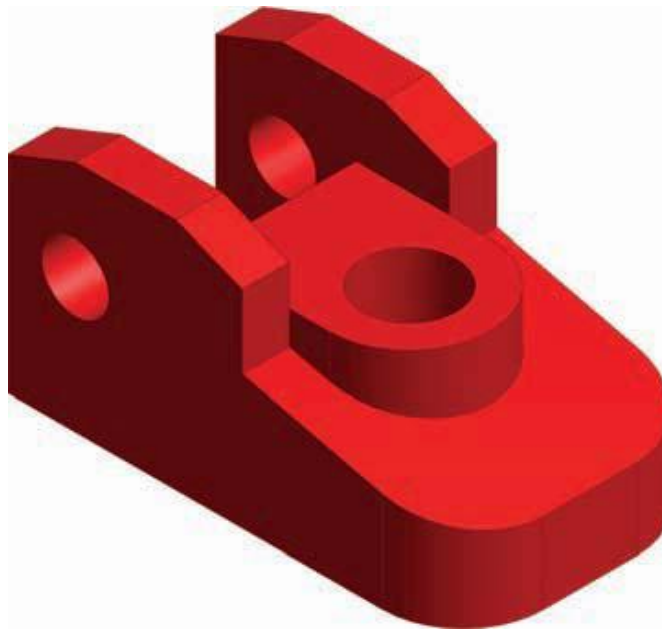


Figura 1 Dibujo o Diseño de un sólido asistido por computador CAD.

Fuente: (Madsen, 2012)

2.1.2.2 Objetivo del CAD

El objetivo principal del CAD es asistir al proyectista al diseño de un sistema, brindando las herramientas que necesita, actualmente existe un sin número de recursos

para la comunicación con la computadora, por ello el programador implementa aquellos que le son más familiares. (Sanchez, 2014, p. 275).

2.1.2.3 Definición de CAE.

Ingeniería Asistida por Ordenador (CAE) es el método de utilizar computadoras en el diseño, análisis y fabricación de un producto, proceso o proyecto. CAE son la simulación, análisis, pruebas y optimización de estructuras y sistemas mecánicos utilizando prototipos digitales. La figura 2 muestra un modelo sólido en 3D sometido a pruebas simuladas y análisis de tensiones. (Madsen, 2012)

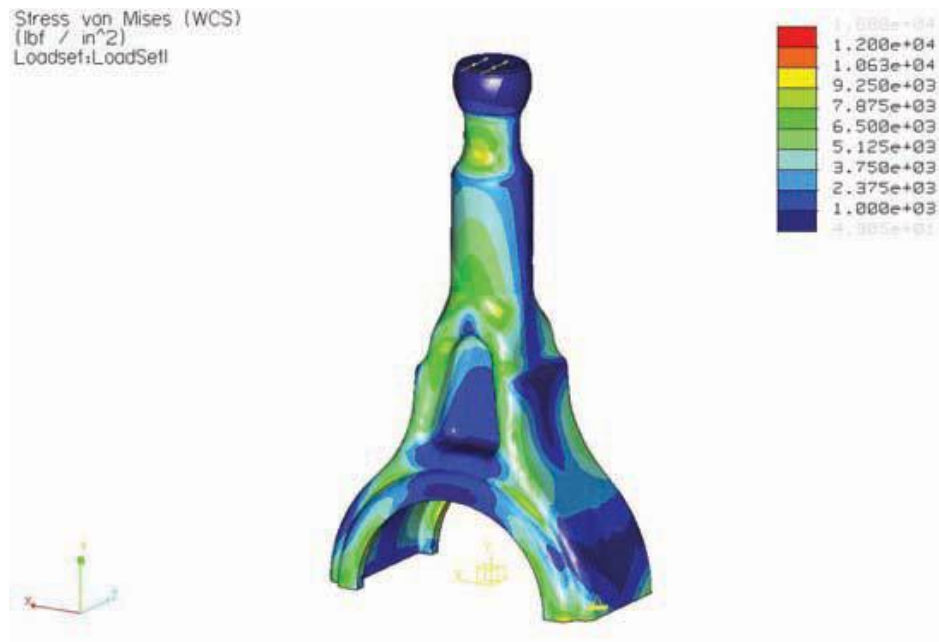


Figura 2 Simulación asistido por computador CAE.

Fuente:(Madsen, 2012)

2.1.2.4 Definición de CAM

Proviene del inglés Computer aided Manufacturing, este sistema permite diseñar los procesos de producción y controlar máquinas herramientas y flujo de materiales por medio de la automatización programable. Además integra la función de diseño y manufactura, traduce las especificaciones finales del diseño a instrucciones detalladas para la máquina que va a fabricar un objeto como se muestra en la figura 3, tiene una gran ventaja debido a que es menos propenso a errores. Los sistemas CAM

permiten a los ingenieros observar la forma de las diferentes partes de un objeto sin la necesidad de crear un prototipo. (Krajewski & Ritzman, 2000, p. 158)

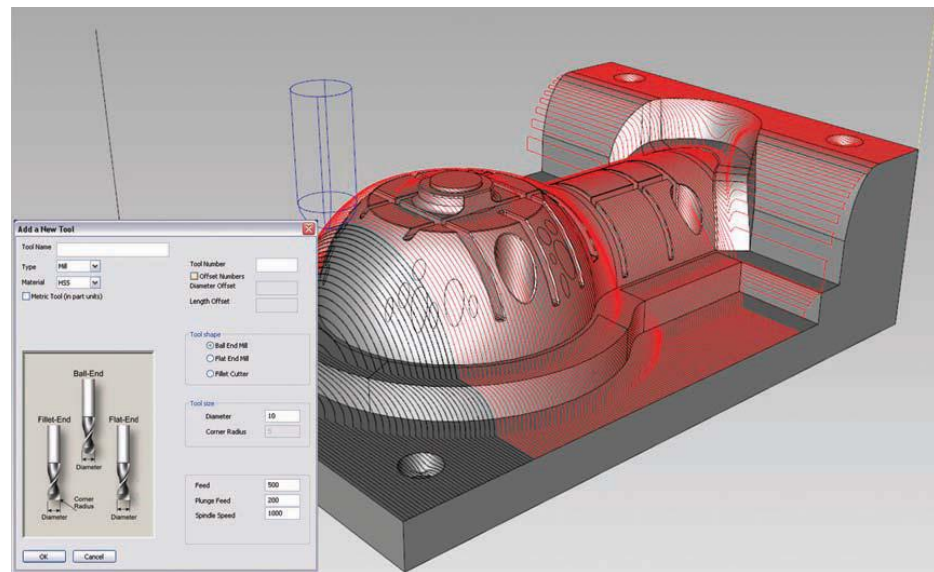


Figura 3 Manufactura asistida por computador CAM.

Fuente: (Madsen, 2012)

2.1.3 Ingeniería inversa.

La ingeniería inversa consiste en la captura y procesamiento de la información geométrica en tres dimensiones de un objeto físico. El proceso de captura de información geométrica se conoce como digitalización 3D, y el procesamiento de datos se denomina reconstrucción de superficies, ver figura 4. (Rodríguez, 2011)

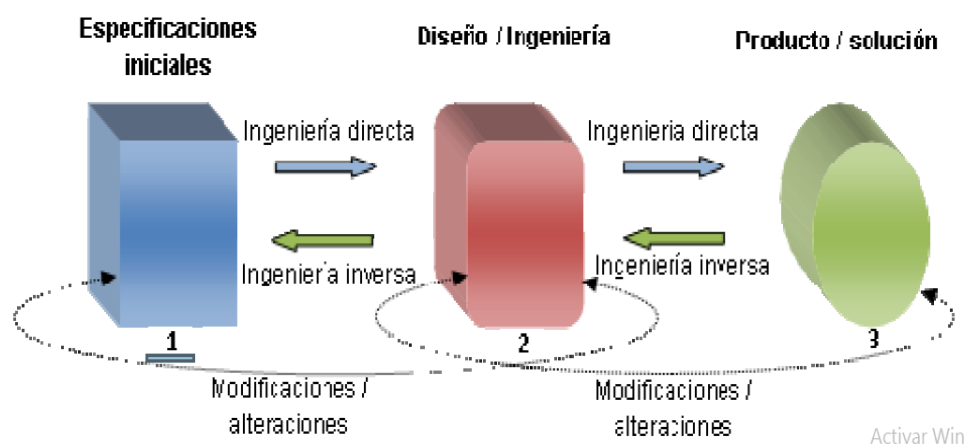


Figura 4 Proceso de la ingeniería inversa.

Fuente: (Rodríguez, 2011).

2.1.3.1 Escáner 3D.

Un escáner 3D es una herramienta de la ingeniería inversa, que permite capturar la forma y características de cualquier tipo de volumen o ambiente y construir un modelo tridimensional del mismo mediante la ayuda de un software específico. Si bien cada tecnología posee sus ventajas y se utiliza para diversos fines, en todas ellas es necesario establecer un sistema de referencia entre el objeto y el escáner. (Parras, Romero, & Cavas, 2016)



Figura 5 Escáner HandyScan.

Fuente: (Parras, Romero, & Cavas, 2016)

La información obtenida por el escáner 3D consiste en una nube de puntos que posteriormente es procesada, lo que se conoce como reconstrucción, de esta manera se determina la forma en que están unidos los puntos en base a estos se puede generar el modelo. (Parras, Romero, & Cavas, 2016)

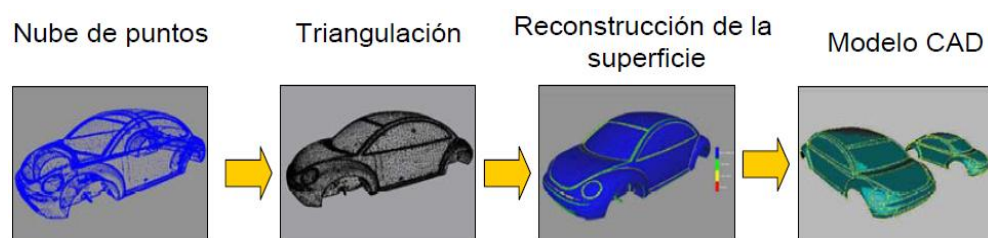


Figura 6 Tratamiento de la nube de puntos.

Fuente: (Rodríguez, 2011).

- Diagonales: la corriente líquida se verifica radial y axialmente, por ello se denomina flujo mixto.

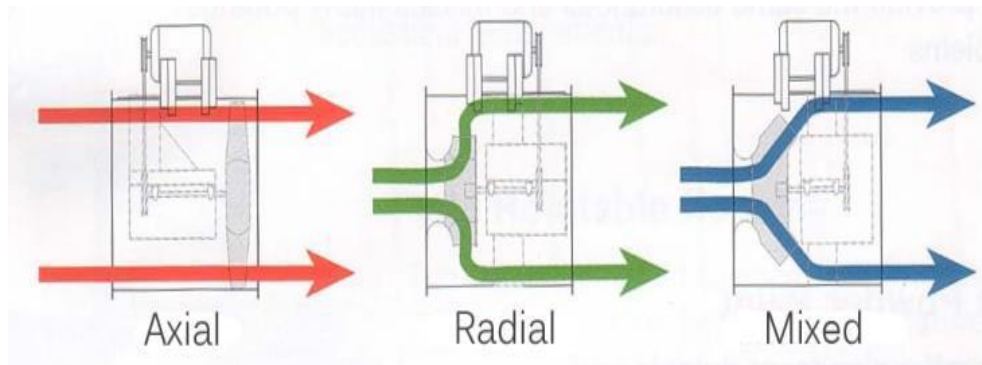


Figura 8 Tipo de Bombas Centrífugas.

Fuente:(Kaljahi, 2015)

2.1.4.1.1 Impulsor (Rodete)

Un impulsor es el componente giratorio de una bomba centrífuga, y en realidad es el elemento principal del equipo. Dependiendo de la aplicación esperada se puede fabricar en muchas formas y materiales diferentes. A veces tiene forma tan complicada llegando a ser un gran reto para el fabricante.

El impulsor de una bomba centrífuga se pueden fabricar de una forma ordinaria en dos tipos: la forma del impulsor: abierto y (o semiabierto), cerrado, los dos tipos se pueden apreciar en las figuras 9 y 10.



Figura 9 Impulsor abierto o semicerrado.

Fuente:(Kaljahi, 2015)

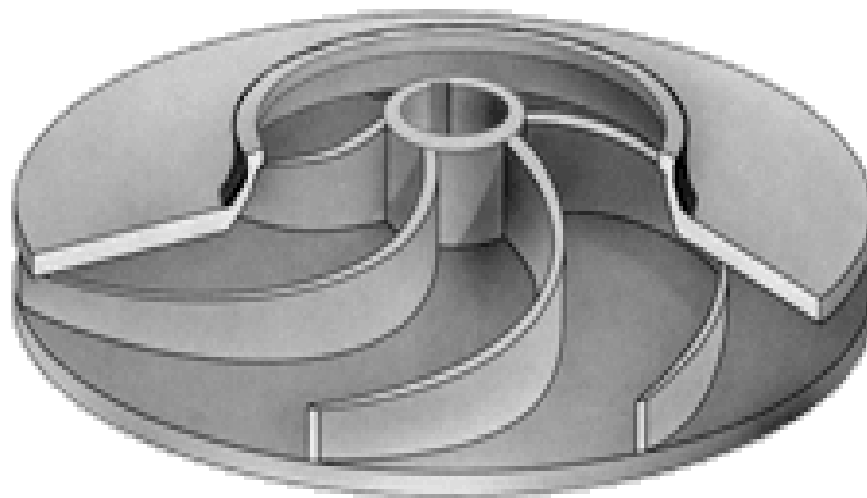


Figura 10 Impulsor cerrado.

Fuente:(Kaljahi, 2015)

2.1.5 Manufactura

Según (L.A.E & Mejía, 2000, p. 32) manufactura “está referida a la transformación de insumos en productos que varían considerablemente de acuerdo a la tecnología empleada.”

Según (Kalpakjian & Schmid, 2008) la manufactura proviene del latín *manu factus* que tiene por significado hecho a mano, por ello “la manufactura involucra la fabricación de productos a partir de materias primas mediante varios procesos, maquinarias y operaciones, a través de un plan bien organizado por cada actividad requerida.”

De acuerdo a las definiciones citadas se puede concluir que manufactura es el proceso por el cual se transforma la materia prima en un producto terminado o elaborado, empleando tecnología, maquinaria y operaciones.

Para realizar el proceso de manufactura se debe responder a varias exigencias y tendencias ver tabla1.

Tabla 1**Exigencias y tendencias de la manufactura.**

No	Exigencias y tendencias
1	Un producto debe satisfacer los requerimientos de diseño, especificaciones y estándares establecidos
2	Un producto debe ser manufacturado utilizando ambiental y económicamente los métodos más amigables
3	La calidad debe ser incorporada en el producto en cada etapa
4	Los métodos de producción deben ser altamente flexibles como para responder a los cambios de demanda
5	Se deben evaluar los nuevos materiales, métodos de producción e integración por computadora
6	Las actividades de manufactura deben ser enfocadas como un gran sistema
7	Una organización de manufactura debe tratar de alcanzar constantemente los más altos niveles de calidad y de productividad

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008)

2.1.6 Proceso de manufactura para la producción de impulsores

Es una técnica donde se desarrollan algunas operaciones que intervienen en la fabricación de un producto (prototipo).

Para el proceso de fabricación de un impulsor hay que tener en cuenta las siguientes operaciones:

- Método de colada en arena (fundición)
- Mecanizado.
- Procedimiento de unión (soldadura, tornillos y pegado).
- Impresión 3D (Prototipado rápido).

2.1.6.1 Método de colada en arena (fundición).

Proceso utilizado para crear formas metálicas sólidas a partir de metal fundido, el cual se vierte en una cavidad que ha dejado un molde como se puede apreciar en la figura 11.

La fundición de arena se utiliza para hacer grandes piezas (normalmente de hierro y acero, pero también de bronce, latón, aluminio). El metal fundido se vierte en una cavidad del molde formada de arena (natural o sintética).

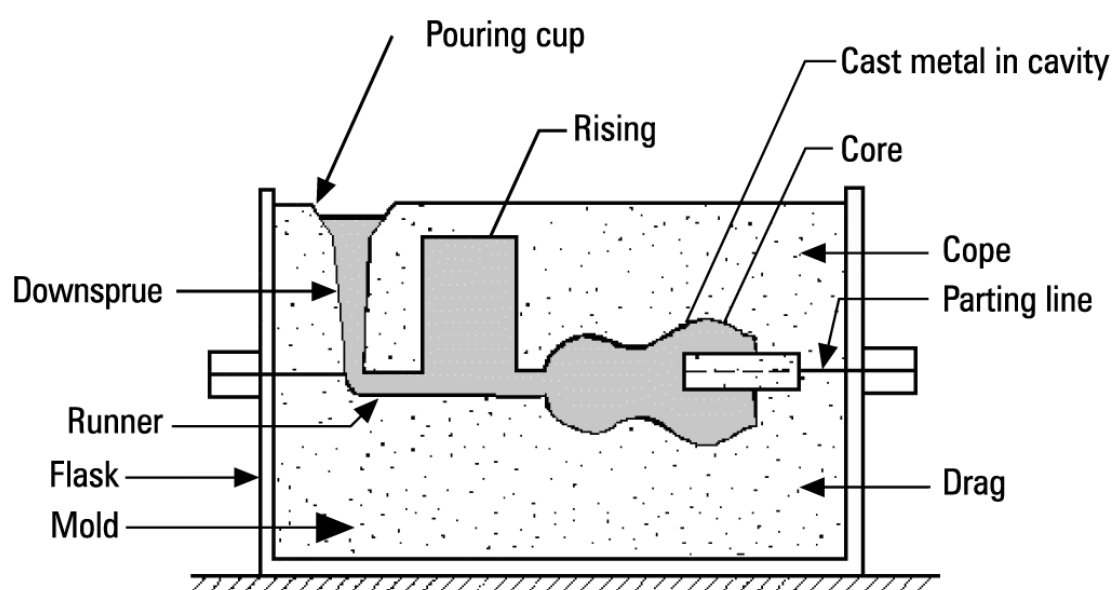


Figura 11 Cavidad de una pieza para colado en arena.

Fuente:(Kaljahi, 2015)

2.1.6.2 Proceso de mecanizado para la producción de impulsores.

Este método se utiliza principalmente para dar los acabados superficiales o mecanizar un impulsor de forma complicada lo que dependerá el tipo de máquina. Este procedimiento entre el otro método puede resultar costoso porque necesitaba máquinas CNC y trabajos de expertos. La rutina es así, el procedimiento de diseño se realiza a través de software CAD, luego estos datos son analizados por software CAM los procesa y para luego pueden ser transferidos a la máquina CNC.



Figura 12 Mecanizado de un impulsor abierto.

Fuente:(Kaljahi, 2015)

2.1.6.3 Procedimiento de unión.

En algunos casos, la forma del impulsor es complicada y dependiendo del material que se utilizará, y las facilidades de fabricación puede tomarse esta estrategia. La soldadura se utilizan en algunos casos para unir las paletas a la parte de cubierta del impulsor o a su vez se realiza mediante la unión con tornillos. La figura 12 muestra el Impulsor fabricado mediante procedimiento unión por tornillos. El beneficio de este método es de bajo costo y tiempo comparado con el método de mecanizado, también tienen limitación como la aplicabilidad en placas estrechas. Además, implica algunos problemas y restricciones este procedimiento tales como la corrosión y la erosión.

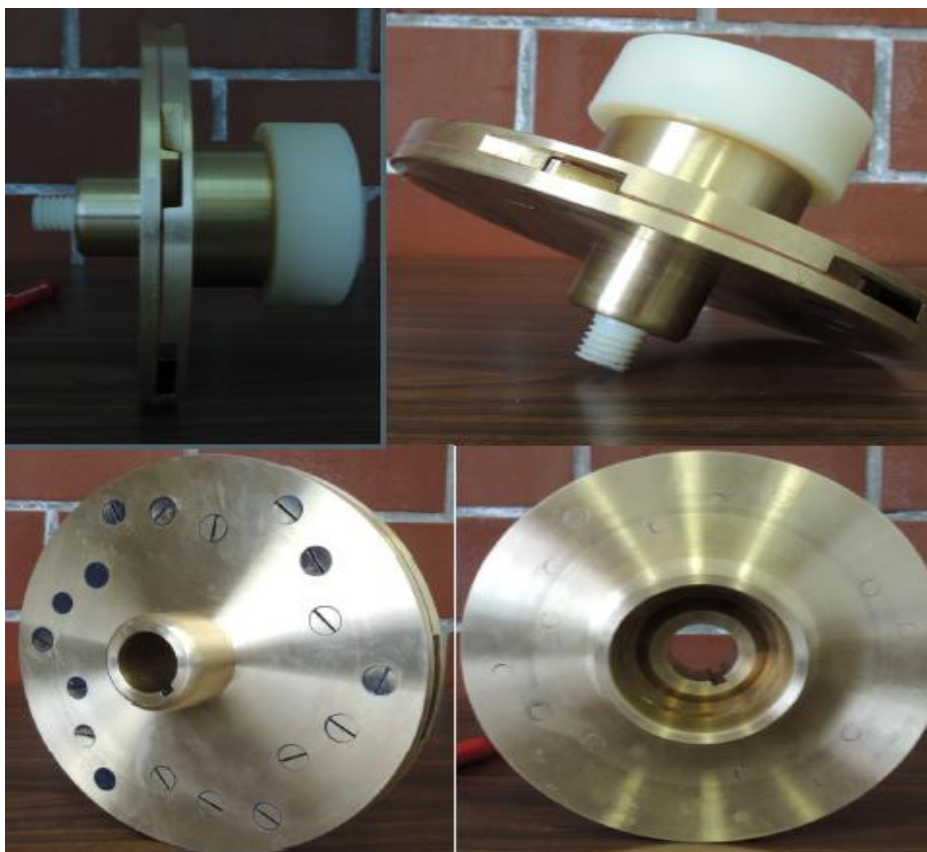


Figura 13 Procedimiento por unión mediante tornillos.

Fuente: (Miranda, 2014)

2.1.6.4 Impresión o prototipado rápido 3D

Como su nombre lo indica, construye objetos en tres dimensiones partiendo de modelos digitales, tiene el mismo concepto de impresión de texto, a diferencia que la impresora en lugar de usar tinta, usa materiales para crear un objeto mediante el depósito de capa por capa, hace décadas existe la tecnología de impresión 3D, este tipo de impresión se concibió para la construcción de prototipos de manera rápida y fácil. (Jarauta, et al., 2014)

2.1.6.5 Materiales para impresoras 3D

Actualmente existen diferentes tecnologías de impresión 3D, depende del material y la forma del objeto solido que se pretende imprimir, ya que se pueden utilizar diferentes tipos de polímeros para materializar el objeto. Ver figura 14.

Los principales polímeros que se utilizan en impresión 3D son:

- **ABS:** es un tipo de termoplástico que se compone por tres grandes componentes, el acrilonitrilo, butadieno y estireno, aunque son derivados del petróleo son resistentes ante grandes impactos, altas temperaturas y ataques químicos, los objetos ABS se pueden pulir, lijar, limar y realizar un sin número de procesos industriales. Este tipo de material trabaja con temperatura entre 230 y 245 grados. (Mediatrends, 2015)
- **PLA:** es un tipo de poliácido láctico creado a partir de recursos naturales renovables como la caña de azúcar y almidón de maíz, siendo un compuesto biodegradable no contaminante, es de fácil uso debido a que para imprimir funciona con temperaturas más bajas que el ABS, oscilando entre los 190 y 200 grados, pero el producto obtenido es más frágil y tiene menos vida útil. (Mediatrends, 2015)

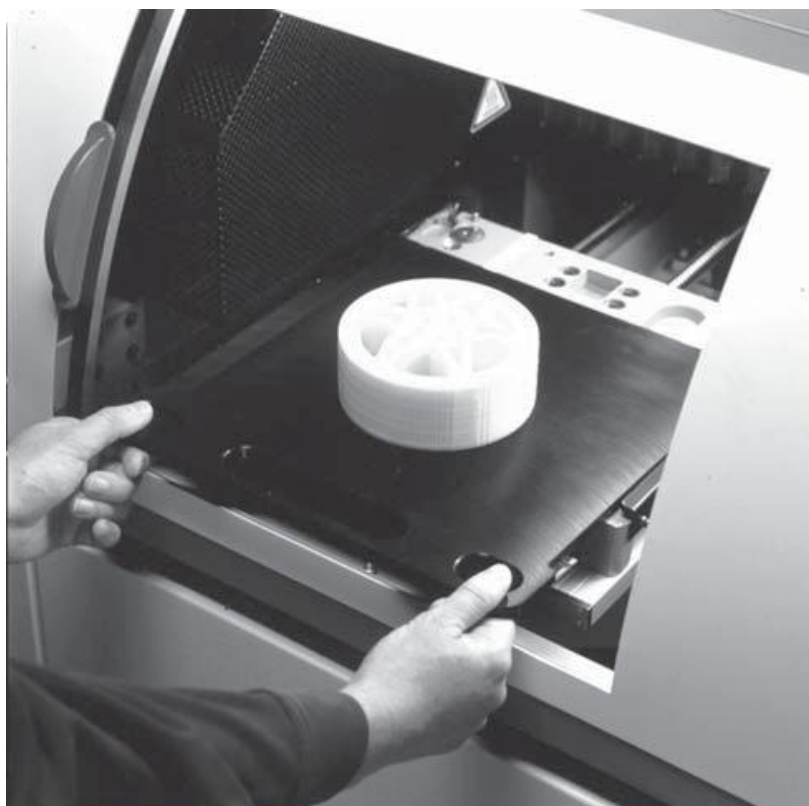


Figura 14 Impresora 3D.

Fuente: (Madsen, 2012)

CAPÍTULO III

DISEÑO DEL IMPULSOR

Alrededor del mundo una parte compleja es el diseño y la fabricación de rodetes para bombas centrífugas, siendo un desafío para la parte de la ingeniería, se puede decir que la construcción mecánica determina el funcionamiento eficiente del rodete.

3.1 Determinar las variables que intervienen en el diseño mecánico del Impulsor.

Para enfocarse en la ingeniería inversa y crear el rodete con las mismas características al diseño mecánico original, se debe tomar en cuenta algunas variables como el desempeño o rendimiento de la bomba, las cuales vienen dadas por garantía (fabricante) como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2

VARIABLES DE RENDIMIENTO DE LA BOMBA.

DATOS DE GARANTÍA DE LA BOMBA JIANGSU XINTAI PUMP & VALVE MANUFACTURING CO., LTD.			
NÚMERO : 2015204		MODELO : CYIH 100-80-125	
		DATE: 2015-03	
VARIABLES		VALOR	UNIDADES
CAPACIDAD O CAUDAL	Q	100	m ³ /s
POTENCIA	P	11	Kw
ALTURA (CABEZA) 5-20	P1	0.24	m
VELOCIDAD	Rev.	2900	rpm

3.2 Obtención de la geometría del impulsor

Para la adquisición de la geometría del rodete (CAD) y dar cumplimiento con el objetivo del proyecto de tesis, se puede realizar con los siguientes pasos y que además se interpreta de manera gráfica en la figura 16.

- Escaneado del rodete.
- Modelado del impulsor en 3D con software CAD.

Para el desarrollo de estos pasos se tiene que hacer uso de equipos y software especializados en el área de ingeniería inversa ver tabla 3.

Tabla 3

Características de los equipos y software que se utilizaron para el diseño asistido por computador (CAD)

EQUIPO/SOFTWARE	NOMBRE	CARACTERÍSTICAS
Escáner laser 3d	Go! SCAN 50	Escáner portátil captura datos a color, de velocidad de medición rápida.
Software de adquisición de nube de puntos	Vx element. V5	Procesa los datos receptados por el escáner y procesa la nube de puntos en un formato .cst .
Software de modelado CAD	Geomagic design 2016	Procesa el formato .cst transformándolo a un formato .stl , puede realizarse el CAD el mismo que se puede exportar a un programa CAD.
Software de modelado y transformación de formato. CAD.	Solidworks 2106	Realiza el CAD de una pieza.
Software análisis y validación CAE	Solidworks 2106.	Software CAE el cual ayuda en la validación de un producto.

El escaneado del impulsor se realiza con el escáner mencionado en la tabla 3 en el laboratorio de prototipado de CAD-CAM de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica Chimborazo (ESPOCH), la cual cuenta con los equipos y licencias de los softwares mencionados.

3.3 Escaneado del impulsor.

El proceso de escaneado se realiza de la siguiente manera:

- Preparación de la superficie de la pieza.
- Escaneado y exportación.
- Tratamiento de la nube de puntos.

3.3.1 Preparación de la superficie del impulsor.

Se limpia la superficie del rodete, después se procede a pintar toda las caras del rodete de color blanco mate, seguido a esto se colocó puntos de reconocimientos (target) principalmente en los álabes (2 en la cara frontal y otros 2 en la cara posterior) lo cual sirve como referencia para que escanear reconozca todas las partes físicas de la superficie del impulsor. Ver figura 15.

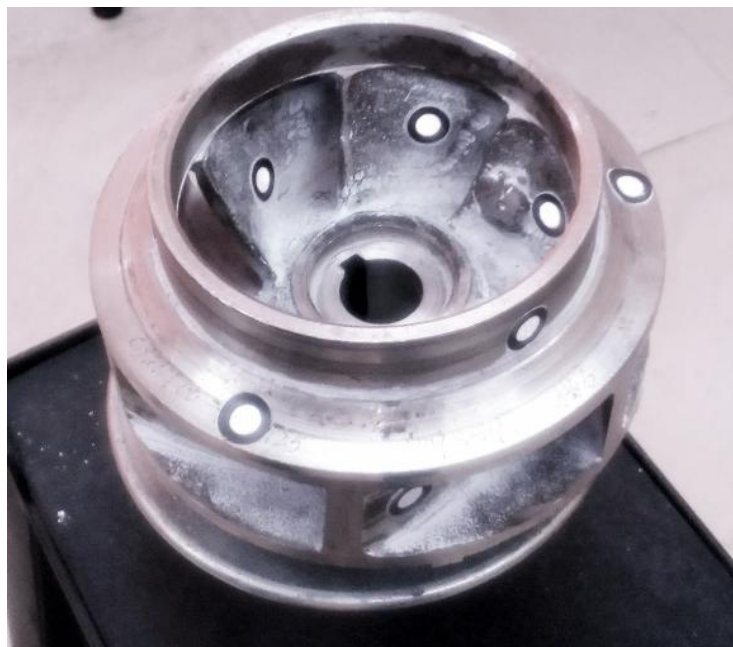


Figura 15 Rodete preparado para ser escaneada.

3.3.2 Escaneado y exportación.

En el proceso de escaneado consiste en que la cámara del escáner debe ir enfocando el objeto de manera que capture una serie de puntos en el espacio (x,y,z) y genere una nube de puntos en la área gráfica del software (Vx - element), la pieza debe permanecer estable con una luz ambiente adecuada, además se debe escanear el objeto de una manera constante a una aproximación de 30 – 40 mm.

Como se menciona anteriormente el impulsor cerrado es un objeto que tiene zonas complejas para escanear, por lo tanto el resultado no será 100%, y que para solucionar dicho problema se realiza un tratamiento de las superficies no escaneadas. Ver figura 16.

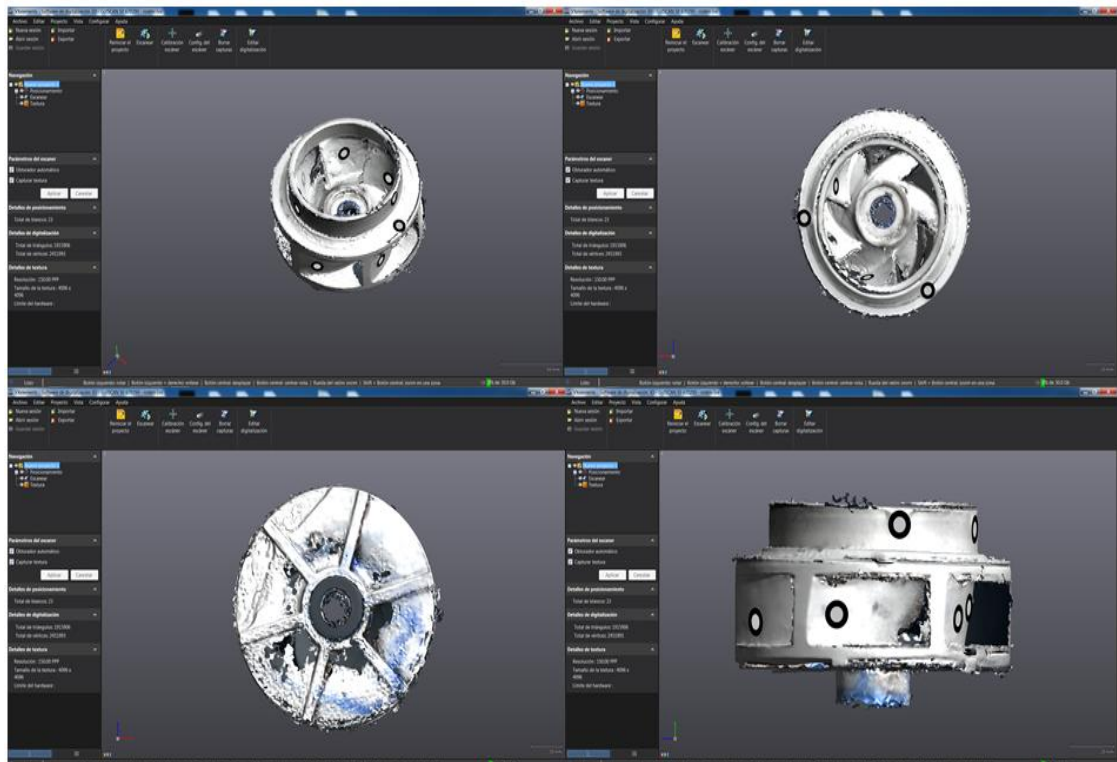


Figura 16 Nube de puntos del impulsor escaneado.

El escaneado el rodete en forma de nube de puntos lo exportamos en formato stl. Binario, para luego importarlo desde otro software el cual se encarga del tratamiento de la nube de puntos.

3.3.3 Tratamiento de la nube de puntos

Para tratamiento de la nube de puntos se trabaja con el software Geomagic Design, donde se importa el archivo stl binario al área de dibujo del programa, se efectúa un tratamiento con herramientas del software, las cuales ayudan a rellenar las superficies que no fueron escaneadas sin alterar sus dimensiones, a tal punto que se obtiene una imagen con un porcentaje de exactitud del 98 % con respecto a la pieza real, este proceso se puede observar en la figura 17.

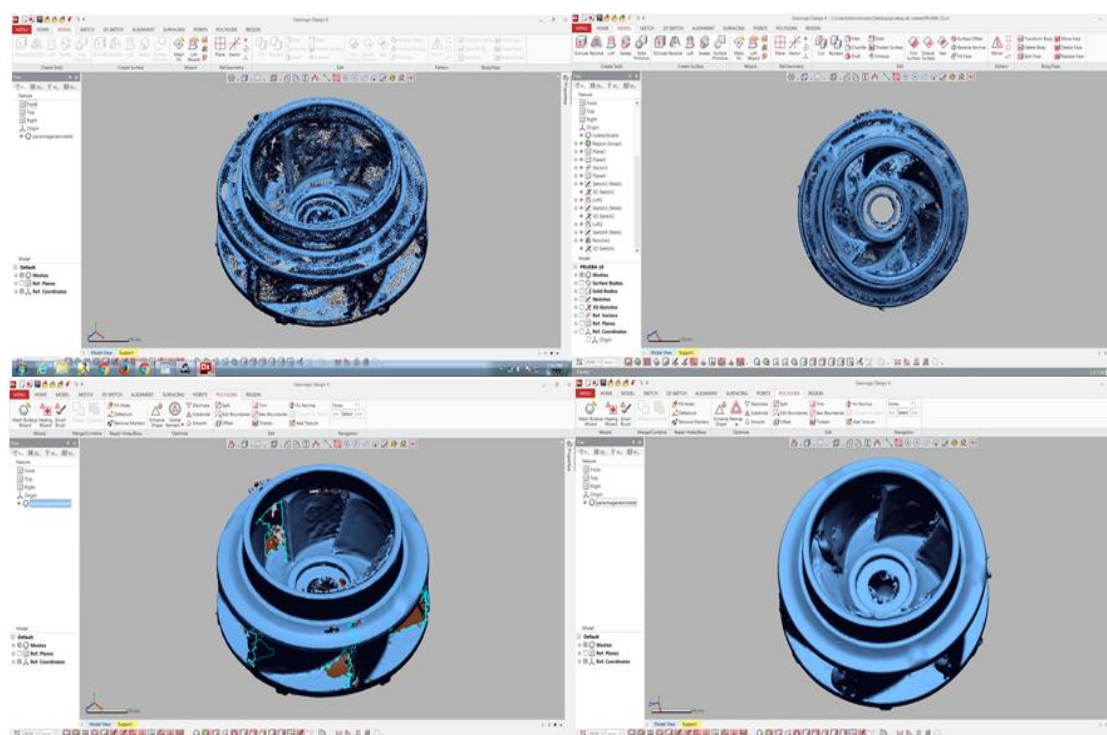


Figura 17 Tratamiento de malla.

3.4 Modelado del Impulsor

Una vez ya arreglada y depurada la malla se ejecuta el reconocimiento del croquis (líneas color magenta) que por defecto genera la nube de puntos (NURBS) en un sistema de referencias (x, y, z). Con la ayuda de herramientas del software se crea un nuevo croquis en 2D siguiendo la trayectoria del croquis anterior como se observa en la figura 18.

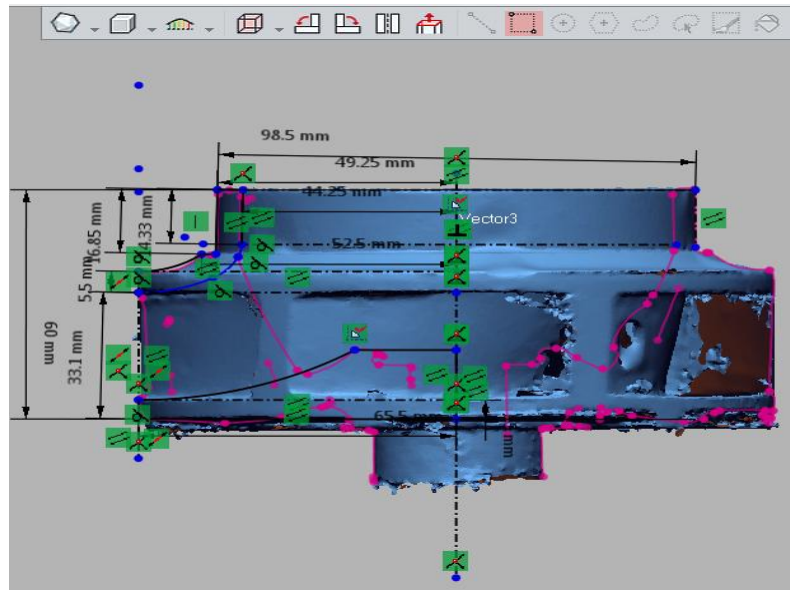


Figura 18 Creación del croquis.

3.4.1 Evaluación de la geometría del impulsor.

Creado el croquis se procede al modelado utilizando herramientas de extrucción y revolución que provee el software, y a medida que se crea la pieza se realiza la validación del prototipo conceptual mediante una herramienta de análisis geométrico del programa, esta compara la nube de puntos y el sólido, revelando las zonas que tengan una desviación geométrica de acuerdo a una barra de colores, el que pinta de color verde muestra que no existe ninguna desviación, el azul (valor menor al espesor especificado) y el rojo (valor mayor al espesor especificado) como se puede apreciar en la figura 19.

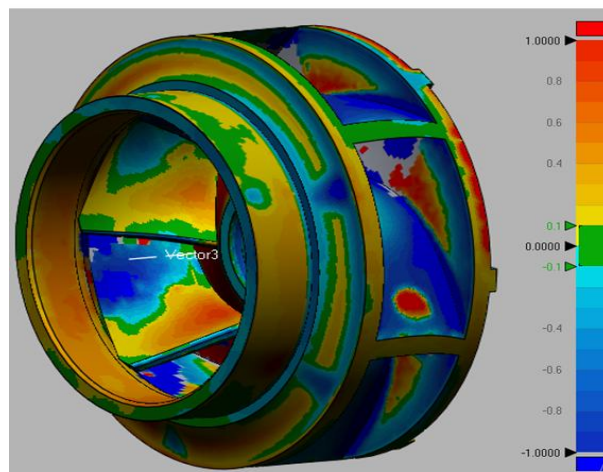


Figura 19 Evaluación de la geometría.

Se efectúa la transferencia del modelo a otro software especializado en CAD (Solidworks), se exporta todas las operaciones de diseño que se utilizaron para construir el sólido. Cambiando de formato stl a sldprt, ver la figura 20.

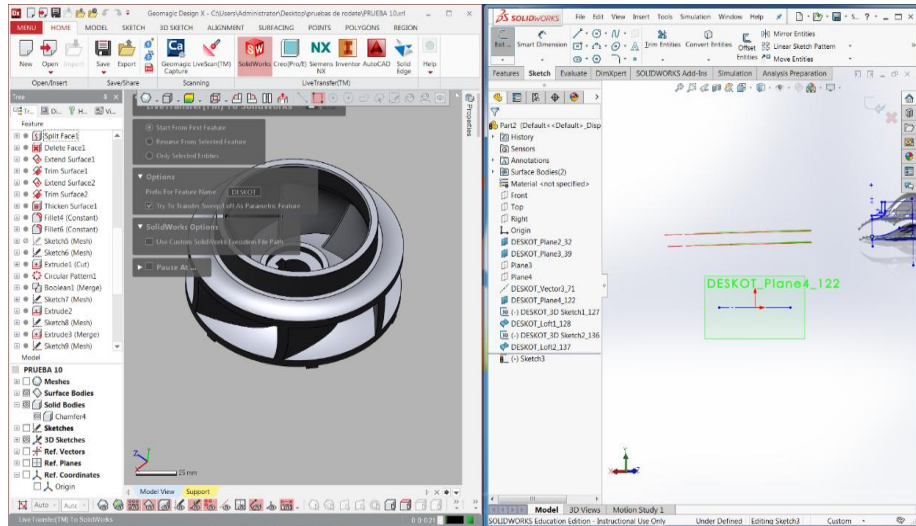


Figura 20 Transferencia del sólido de Geomagic design a Solidworks.

3.4.2 Reconstrucción del impulsor en Solidworks.

Terminada la operación de exportación se procede a la reconstrucción del CAD del impulsor y se verifica las medidas con la herramienta de calcular del menú de Solidworks, ver la figura 21.

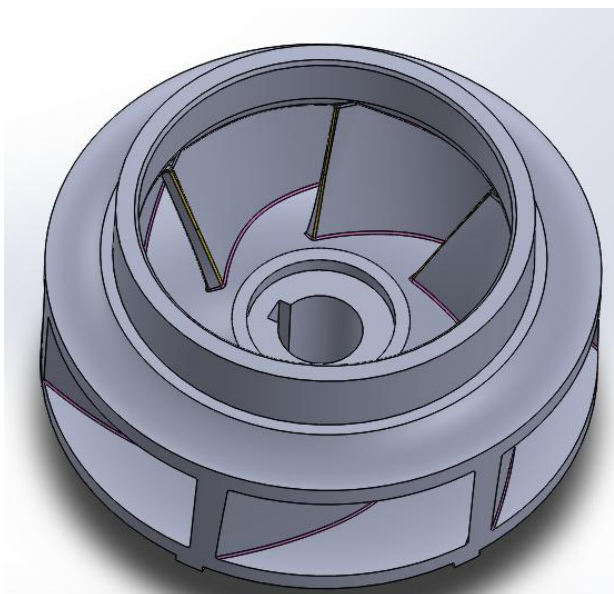


Figura 21 Prototipo del impulsor en Solidworks.

3.5 Selección de materiales alternativos para el impulsor.

La selección del material apropiado para construir el prototipo propuesto se analiza y estudia las características del material base con el que está constituido el rodete real u original, además las causas efectos que provocan el deterioro del mismo.

Para determinar el tipo de material y sus características se realiza los siguientes ensayos:

- Análisis Químico.
- Ensayo de dureza Brinell.

3.5.1 Análisis Químico.

Este procedimiento se realiza en un espectrómetro, el cual ayuda a identificar la composición química que contiene el material base, los resultados se pueden apreciar en la tabla 4.

Tabla 4

Datos de análisis con espectrómetro.

COMPOSICIÓN QUÍMICA		
MÉTODO: FE100		
Material	Variable	Concentración %
Carbono	C	0.023
Silicio	Si	0.080
Manganeso	Mn	0.0050
Fósforo	P	0.0100
Azufre	S	0.0100
Cromo	Cr	0.0100
Molibdeno	Mo	0.013
Níquel	Ni	0.142
Cobre	Cu	0.015
Aluminio	Al	0.0700

CONTINUA 

Cobalto	Co	0.014
Magnesio	Mg	0.0050
Niobio	Nb	0.014
Titanio	Ti	0.0030
Vanadio	V	0.0050
Wolframio	W	0.100
Hierro	Fe	99.60

También se realiza un análisis metalográfico. Lo cual determina que es una estructura monofásica (obtenidos por cristalización primaria), Ver figura 22.

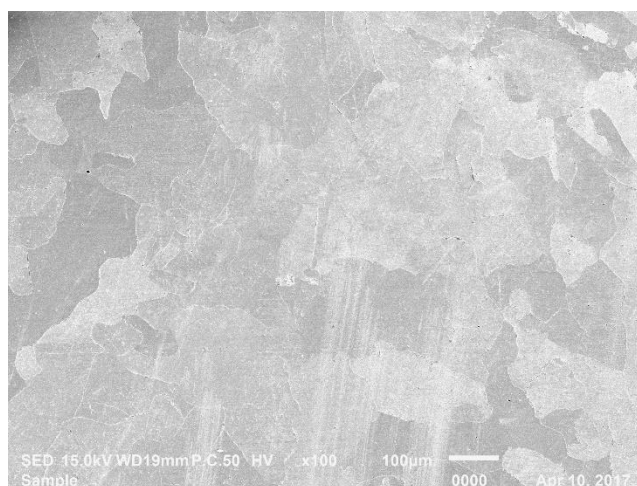


Figura 22 microestructura del material del impulsor original.

3.5.2 Ensayo de dureza Brinell.

Este ensayo se realiza en una máquina llamada durómetro, es un método por indentación, donde se fuerza una bola de acero en la superficie del material a estudiar, se mide el diámetro impreso y se calcula la dureza mediante la fórmula siguiente:

$$HB = \frac{2P}{\pi D^2} \frac{1}{1 - \frac{d^2}{D^2}}$$

Donde:

P: 187.5 Kgf (carga a utilizar medida).

D: 5 mm (diámetro de la bola (indentador)).

d: 1.59 mm (diámetro de la huella en superficie).

$$HB = \frac{2(187.5 \text{ kgf})}{\pi 25 \text{ mm}^2} \frac{1}{1 - \frac{1}{1 - \frac{2.53 \text{ mm}^2}{25 \text{ mm}^2}}}$$

$$HB = 92 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2} = Hv \text{ (dureza vicker).}$$

De acuerdo composición química, la microestructura y la dureza del material se puede determinar que es un material de bajo carbono (hierro común). Siendo un material no adecuado para este tipo de piezas.

3.5.3 Causas que deterioran el impulsor.

Se puede observar que los álabes sufrieron un desgaste por un fenómeno llamado cavitación, erosión y corrosión que es muy regular en este de piezas por el trabajo que efectúan ver figura 23.



Figura 23 Rodete deteriorado por el desgaste.

Tomando en cuenta que la bomba centrífuga donde se aloja el rodete, trabaja a una potencia de 14.3 hp a 2900 rpm y su función es succionar aguas alcalinas ($< 50 \text{ mg/LCaCo}_3$) ver anexo 1, cumpliendo 8 horas diarias (160 horas/mes) a una temperatura de $21 \text{ }^\circ\text{C}$ a $67 \text{ }^\circ\text{C}$, lo que expone a bajar la vida útil de las piezas de la bomba principalmente la del impulsor donde existen variaciones de presión que crecen en función de la temperatura del fluido, esto a su vez crea el fenómeno llamado cavitación lo cual conlleva a la erosión desgastando la superficie de los álabes del impulsor, destruyéndolo e invalidando su funcionamiento. La variación de presión está en función de la temperatura como se muestra en la figura 24.

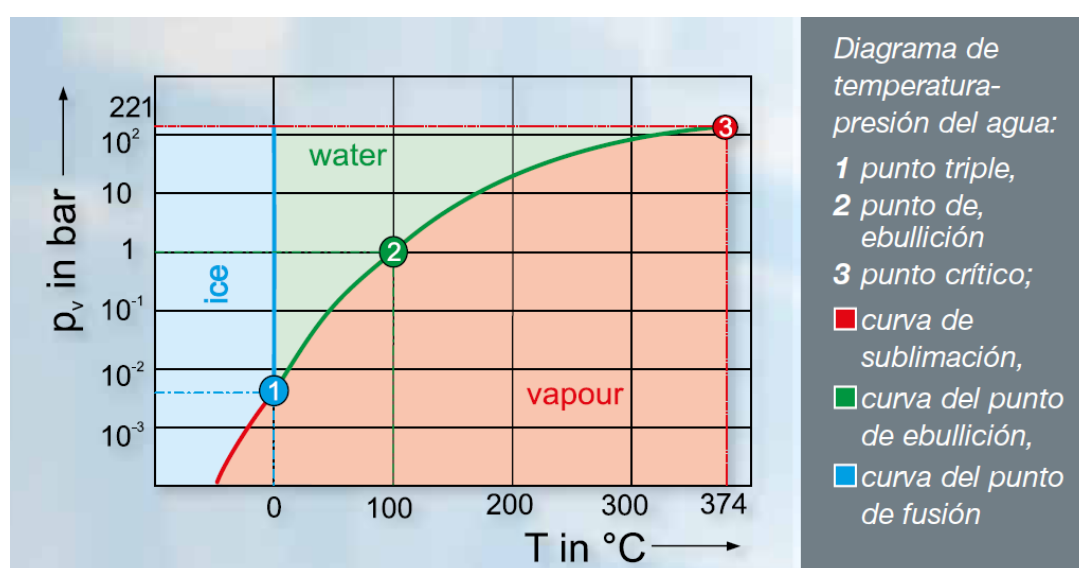


Figura 24 Temperatura vs Presión.

Fuente: (Gunt Hamburg, 2017).

Una manera para contrarrestar estos tipos de problemas (cavitación-erosión y corrosión) que desgastan al rodete se debe seleccionar un material con una dureza adecuada. (UAN, 2012).

3.5.4 Criterio de selección de materiales.

Para seleccionar el material se recurre al criterio de selección de Ashby el cual propone que mediante la utilidad que tenga el material (requisitos de diseño), se establecen parámetros de desempeño y con la ayuda del método gráfico (software), se puede aproximar a una selección del material ideal para el impulsor. (Ashby, 2005).

De acuerdo a los requisitos de diseño tenemos:

- Función del impulsor. ¿Cuál es la función del impulsor?
- Condiciones a optimizar. ¿Qué condiciones debe cumplir?
- Objetivos. ¿Qué características se deben maximizar o minimizar del material?
-

3.5.4.1 Función del impulsor.

- Rotar e impulsar el fluido (agua alcalina).

3.5.4.2 Condiciones a optimizar:

Las condiciones que serán optimizadas serán superiores al material original del impulsor

- Resistencia a la fractura > 2.6 MPA. (Ashby, 2005)
- Dureza adecuada > 92 HV.
- Resistente para trabajar con agua alcalina. (aceptable/excelente).
- Resistencia a la Temperatura. (21°C - 100°C).
- Adecuado para manufactura. (Fundición y mecanizado).

3.5.4.3 Objetivo.

El objetivo es maximizar la dureza del material y el límite elástico, y por otra parte minimizar el costo, sin omitir ninguna restricción (condiciones a optimizar)

Se realiza la selección del material por método gráfico en dos aproximaciones donde se debe analizar los materiales según el índice desempeño u objetivos que se requiera cumplir.

3.5.5 Primera aproximación.

El siguiente gráfico se construye de acuerdo al índice desempeño, donde que a medida que se maximice la dureza también se aumente el límite de elasticidad.

$$M1 = H / \sigma$$

Donde:

H = La dureza (Vicker o MPA)

σ = Límite de elasticidad.

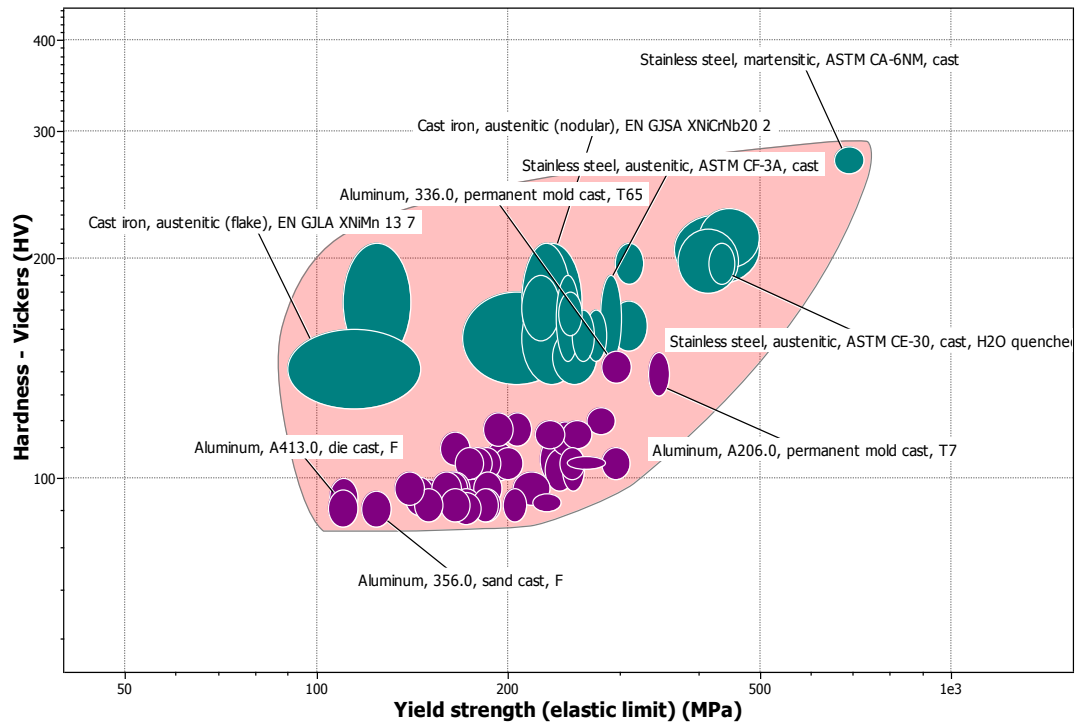


Figura 25 Dureza vs Limite de elasticidad.

Fuente (Ashby, 2005)

3.5.6 Segunda aproximación.

La gráfica a continuación indica que en el eje y se sitúan valores de la dureza del material (H) y en el eje x el costo (C), el objetivo es Minimizar el costo sin que la dureza disminuya, para lo cual en esta gráfica se traza un pendiente (valor de 1), la misma que establece que materiales que estén sobre la línea son los más adecuados tanto en costo como en dureza. $M2 = H/C$. Ver la figura 26.

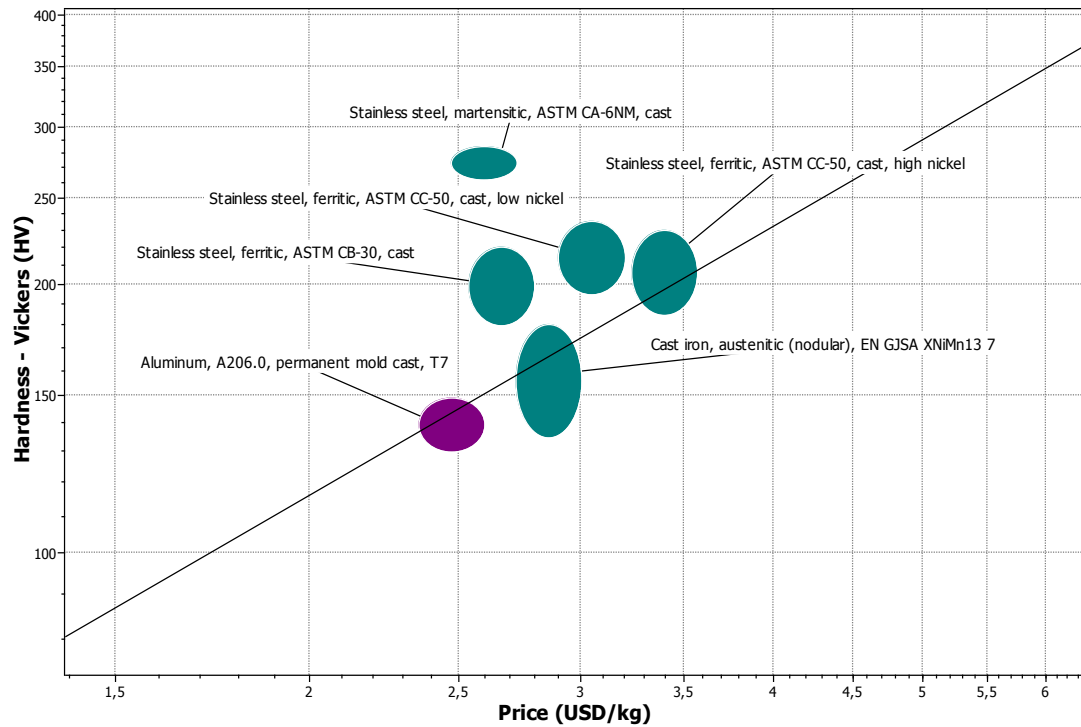


Figura 26 Dureza vs Costo.

Fuente (Ashby, 2005)

- En la 1era aproximación se simplifica mediante el análisis del índice de desempeño ($M1 = H/6$) quedando un total 60 materiales de entre 1895, entre estos están: aleaciones de aluminio, aceros nodulares y aceros inoxidable, ver tabla 5.

Tabla 5

Primera aproximación materiales para impulsor.

PRIMERA APROXIMACIÓN MATERIALES PARA IMPULSOR.

N° MATERIAL

- 1 *Aluminio, A206.0, fundición de molde permanente, T7
- 2 *Hierro fundido, austenítico (nodular), EN GJSA XNiCr20 2
- 3 Hierro fundido, austenítico (nodular), EN GJSA XNiCrNb20 2
- 4 Acero inoxidable, austenítico, ASTM CE-30, fundido.
- 5 Acero inoxidable, austenítico, ASTM CE-30, fundido, H2O templado
- 6 Acero inoxidable, austenítico, ASTM CF-3A, fundido

CONTINUA 

7	Acero inoxidable, austenítico, ASTM CF-8A, fundición
8	Acero inoxidable, ferrítico, ASTM CB-30, fundición
9	Acero inoxidable, ferrítico, ASTM CC-50, fundición, níquel alto
10	Acero inoxidable, ferrítico, ASTM CC-50, fundición, bajo níquel
11	*Acero inoxidable, martensítico, ASTM CA-6NM, fundido

- En la 2da aproximación la gráfica muestra un resultado 6 materiales de 1895 materiales, siendo los más apropiados los que se encuentra sobre la pendiente de selección como por ejemplo el aluminio A206.0 T7 es el más barato y tiene una dureza adecuada a comparación de los otros que resultan tener mayor dureza pero son costosos, ver tabla 6.

Tabla 6

Segunda aproximación lista de materiales para impulsor.

SEGUNDA APROXIMACIÓN LISTA DE MATERIALES PARA IMPULSOR.	
N°	MATERIAL
1	*Aluminio, A206.0, fundición en molde permanente, T7
2	Hierro fundido, austenítico (nodular), EN GJSA XNiMn13 7
3	Acero inoxidable, ferrítico, ASTM CB-30, fundición
4	Acero inoxidable, ferrítico, ASTM CC-50, fundición, níquel alto
5	Acero inoxidable, ferrítico, ASTM CC-50, fundición, bajo níquel
6	*Acero inoxidable, martensítico, ASTM CA-6NM, fundido

De entre las aproximaciones se escoge los materiales que cumplan con los objetivos y sean los más comunes en la evaluación de las aproximaciones, ver tabla 7.

Tabla 7

Selección de material de acuerdo a sus características.

Características	Aluminio A206.0 T7	Hierro fundido, austenítico (nodular), EN GJSA XNiCr20 2	Acero inoxidable ASTM CA- 6NM, fundido
Resistencia al agua alcalina.	Excelente.	Excelente.	Aceptable.
Dureza Vicker.	130-149 HV	145-210 HV	263-285 HV
Límite de elasticidad	357 MPA	250 MPA	725 MPA
Costo	2,6 USD/Kg	4,32 USD/Kg	2,73 USD/Kg
Manufactura	Excelente	Aceptable.	Aceptable.

El material que se muestra como el más adecuado para el proyecto de acuerdo a sus características es el aluminio Al A206.0, T7. Este material será utilizado para crear el prototipo ya que es fácil de obtener y a un bajo costo, pero ante la cavitación es un material vulnerable.

3.6 Análisis y simulación por Ingeniería Asistida por Computador (CAE).

Para el análisis y validación del diseño del rodete se calcula analíticamente para luego con la ayuda de un software de ingeniería asistida por ordenador CAE, realizar la simulación con cargas reales de trabajo.

Para poder asegurar un buen diseño se emplea el factor de seguridad apropiado, que a veces están determinados en tablas de investigaciones anteriores, pero existen casos donde toca calcularlos de acuerdo a algunos parámetros de funcionamiento de la pieza diseñada.

Para tener un factor de seguridad aproximado del impulsor, aplicamos el método de Pugsley el cual parte de la siguiente ecuación: (Wpcalle 2012)

$$FOS = n_{xx} * n_{yy}$$

Donde:

n_{xx} : Factor de seguridad que involucran características A, B y C (Wpcalle 2012).

n_{yy} : Factor de seguridad que involucran características D y E (Wpcalle 2012).

A: Calidad de los materiales.

B: Control sobre la carga aplicada.

C: Exactitud del análisis del esfuerzo.

D: Peligro para el personal.

E: Impacto económico.

Entonces.

$$FOS = n_{xx} * n_{yy}$$

$$FOS = 1.7 * 1.2$$

$$FOS = 2.04$$

Estos datos se encuentran en la tabla 8 y 9.

Tabla 8

Parámetros para el factor de seguridad A, B y C.

Características		B				
		mb	b	r	p	
A= mb	C=	mb	1.1	1.3	1.5	1.7
		b	1.2	1.45	*1.7	1.95
		r	1.3	1.6	1.9	2.2
		p	1.4	1.75	2.1	2.45
A=b	C=	mb	1.3	1.55	1.8	2.05
		b	1.45	1.75	2.05	2.35
		r	1.6	1.95	2.3	2.65
		p	1.75	2.15	2.55	2.95
A=r	C=	mb	1.5	1.8	2.1	2.4
		b	1.7	2.10	2.4	2.75
		r	1.9	2.3	2.7	3.1

CONTINUA 

A=p	C=	p	2.1	2.55	3.0	3.45
		mb	1.7	2.05	2.4	2.75
		b	1.95	2.35	2.75	3.15
		r	2.2	2.65	3.1	3.55
		p	2.45	2.95	3.45	3.95
mb= muy bien			b= bien			
r= regular			p= pobre			

Fuente: (Wpcalle 2012).

Tabla 9
Parámetros para el factor de seguridad E y D.

CARACTERÍSTICAS		D		
		ns	s	ms
E=	ns	1.0	*1.2	1.4
	s	1.0	1.3	1.5
	ms	1.2	1.4	1.6
ms= muy serio		s= serio	ns= no serio	

Fuente: (Wpcalle 2012).

De la ecuación 13 calculamos esfuerzo admisible (σ_{adm}).

- Se calcula para el Aluminio A 206.0 T7

$$\sigma_u = 355 \text{ MPA.}$$

$$\sigma_{adm.} = \frac{\sigma_u}{FOS.}$$

$$\sigma_{adm.} = \frac{357 \text{ MPA}}{2.04}$$

$$\sigma_{adm.} = 175 \text{ MPA.}$$

- Se calcula para el Hierro fundido, austenítico (nodular), EN GJSA XNiCr20 2

$$\sigma_u = 124 \text{ MPA.}$$

$$\sigma_{adm.} = \frac{124 \text{ MPA}}{2.04}$$

$$\sigma_{adm.} = 60,83 \text{ MPA.}$$

- Para el Acero inoxidable ASTM CA-6NM, fundido.

$$\sigma_u = 725 \text{ MPA.}$$

$$\sigma_{adm.} = \frac{725 \text{ MPA}}{2.04}$$

$$\sigma_{adm.} = 355.39 \text{ MPA.}$$

3.6.1 Simulación del impulsor CAE.

La simulación estática se realizó en el paquete de simulación en Solidworks, los datos que se ingresan fueron de presión de 0.21 MPA y una temperatura de 67 °C, como se indica en las figuras 27, 28 y 29.

Los resultados de la simulación se exponen en la tabla 10, donde los resultados de esfuerzo máximo (Von-Mises) muestran una variación esto depende del software empleado para crear la malla, entre más fina sea la malla los valores de esfuerzos serán semejantes.

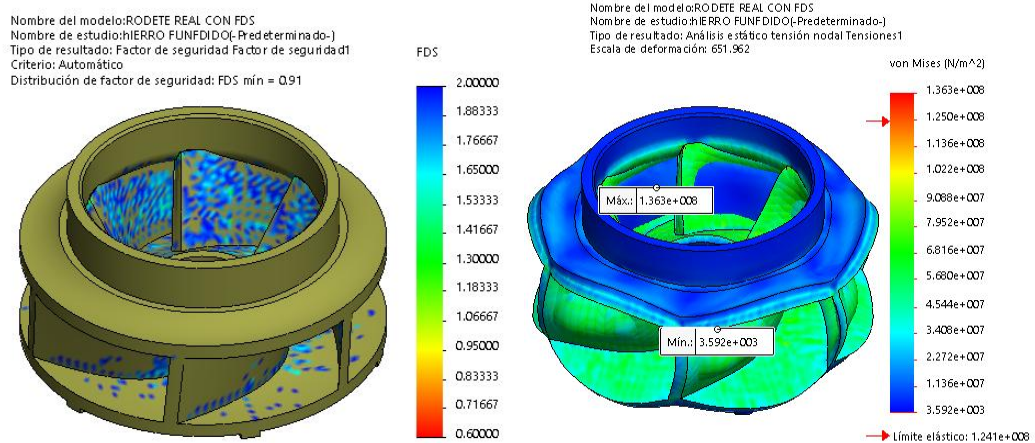


Figura 27 FDS Y Von mises stress, Hierro fundido, austenítico (nodular), EN GJSA XNiCr20 2.

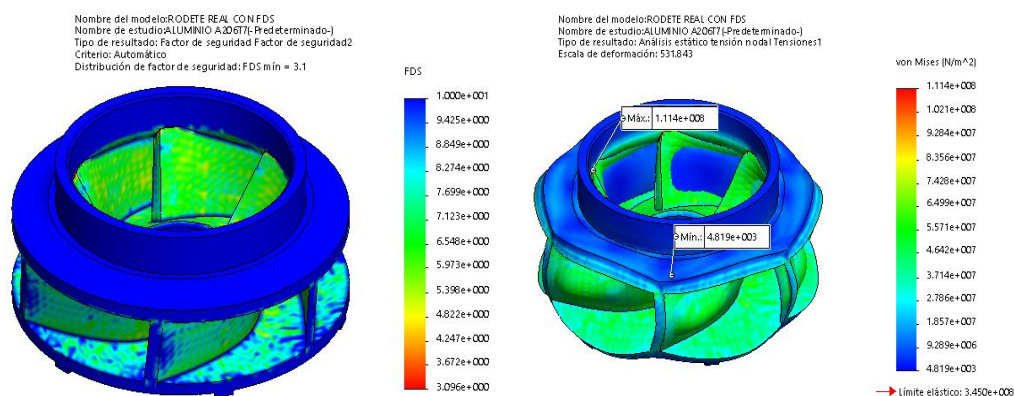


Figura 28 FDS y Von mises stress, Aluminio A 206.0. T7.

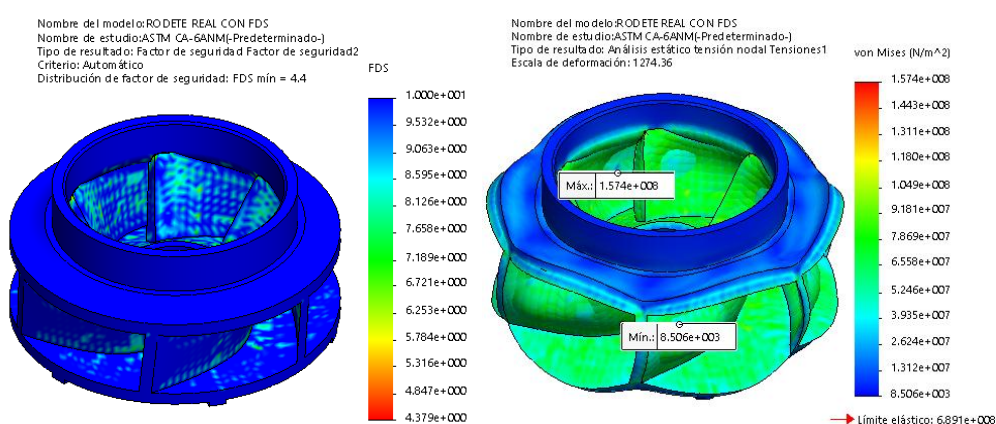


Figura 29 FDS y Von mises stress, Acero inoxidable ASTM CA-6NM, fundido.

Tabla 10

Datos del factor de seguridad y del análisis estructural –Von Mises.

	Hierro fundido, austenítico (nodular), EN GJSA XNiCr20 2	Al A206.0 T7	Acero inoxidable ASTM CA-6NM, fundido.
FDS	0,91	3,1	4,4
Von Mises (esfuerzo máximo)	136,3 MPA	110,9 MPA	157,4 MPA

Una vez terminado el análisis se puede proceder a ejecutar los planos de construcción del impulsor, los cuales se encuentran al final del proyecto como anexo 2 (a, b, c), estos planos fueron construidos de acuerdo a la norma del dibujo técnico, mecánico (INEN 003) con las tolerancias y ajustes necesarios.

CAPÍTULO IV

MANUFACTURA DEL IMPULSOR

La fabricación de un impulsor cerrado es una parte compleja por tener sus álabes dentro del rodete no pueden ser manufacturados tan fácilmente, anteriormente se menciona los métodos de fabricación del impulsor (capítulo 2) y de acuerdo a las herramientas y tecnología disponibles en el medio, se organiza una estrategia para el desarrollo de manufactura del prototipo donde destacan cuatro tipos de operaciones, ver figura 30.

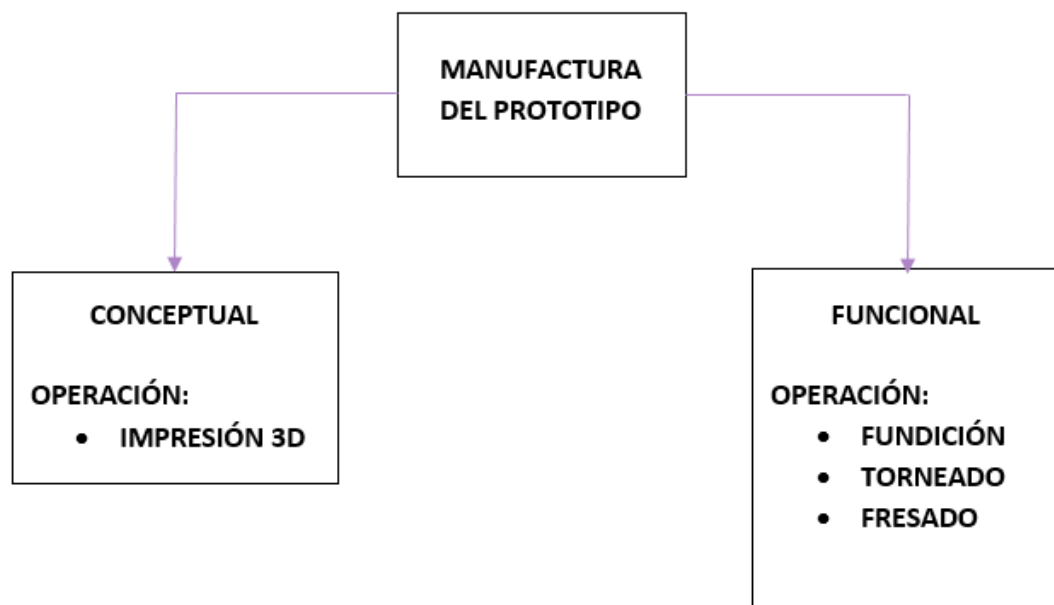


Figura 30 Procesos y operaciones que intervienen en la fabricación del prototipo.

4.1 Manufactura del prototipo conceptual.

El prototipo conceptual se lo materializa con impresión 3D lo cual permite presentar el rodete como un prototipo inicial, de tal manera que se pueda realizar una evaluación visual con respecto a su forma.

Se imprime dos prototipos con distintas impresoras y diferentes materiales, el primero se crea en una impresora con el método fotopolimerizador y con un material ABS (cartucho de resina líquida), se imprime a una escala 1:2 en un tiempo de 7 horas con 51 minutos ver figura 31(a).

El segundo prototipo se realizó a una escala 1:1 con una impresora por el método de extrucción con un material PLA (filamento), lleva un tiempo de 6 horas aproximadamente imprimir el impulsor, ver figura 31(b).

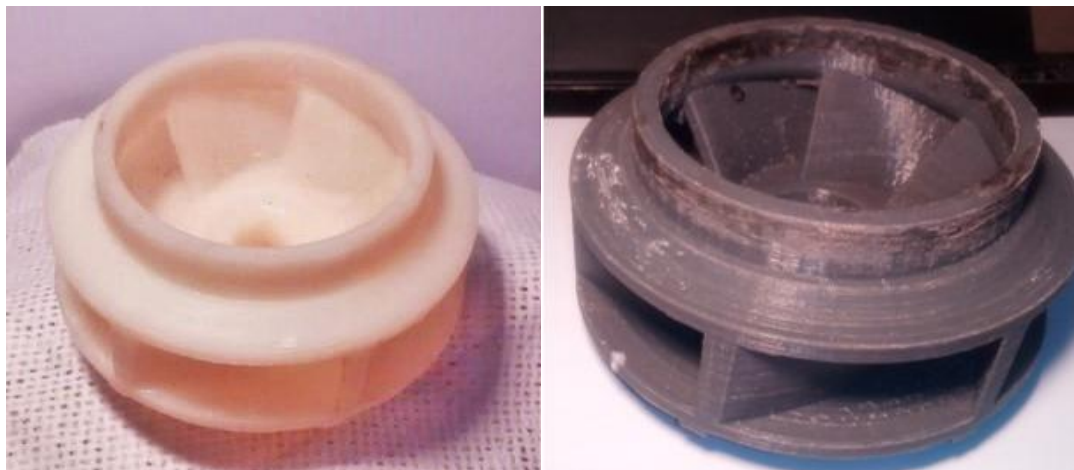


Figura 31 Prototipos impresos. (a) escala 1:2 con PLA. (b) escala 1:1 con ABS

4.1.1 Diferencias entre los materiales de impresión ABS vs PLA.

El ABS es un polímero sintético derivado del petróleo lo cual le hace nocivo, pero es muy resistente y se lo puede mecanizar. El PLA por su parte es un material biodegradable que no es nocivo pero no es muy resistente y no se puede mecanizar, observe la tabla 11 donde se aprecia los valores de las propiedades mecánicas en dichos polímeros.

Tabla 11

Propiedades mecánicas del material ABS y PLA.

PROPIEDADES MECÁNICAS	ABS	PLA
Densidad 30° (g/cm ³)	1.08	1.25
Tensión de rotura (MPa)	12-22	6
Módulo de elasticidad (MPa)	800-1200	3500
Alargamiento de rotura (%)	2-3	6
Resistencia a la flexión (MPa)	23-34	80

CONTINUA



Módulo de flexión (MPa)	750-1100	4000
Resistencia al impacto (J/m)	16	8
Resistencia a la deformación por calor (°C)	52	30
Dureza Shore D	77-80	35
Temperatura de transición vítrea Tg (°C)	82	60

4.2 Proceso de Manufactura del prototipo funcional.

De acuerdo a la estrategia planteada para realizar el proceso de manufactura con el material seleccionado (A206.0 T7), se procede a realizar las siguientes operaciones:

- Fundición
- Torneado.
- Fresado.

4.2.1 Fundición.

La fundición es la operación donde se crea la pieza por el método de colado, en este caso se realiza una fundición no ferrosa de acuerdo a su composición química del A206.0 T7, el cual tiene un punto de fusión 1200 °C, para realizar esta operación se debe elaborar los moldes del impulsor tanto el externo como el interno (núcleo).

4.2.1.1 Fabricación del molde exterior.

Para construir el molde se hace referencia en las medidas del impulsor (planos del impulsor y CAD). Además de esto se toma en consideración:

- Que el molde de arena debe tener un ángulo de salida de 1° ver el esquema de la figura 32.

- La contracción o dilatación volumétrica será el cambio de dimensionamiento que experimenta la pieza (impulsor) al solidificarse durante el proceso de enfriamiento, en el caso del aluminio será 7,1% como muestra la tabla 12.
- Tolerancias para el maquinado, el molde debió tener una medida extra para que la pieza fundida pueda ser mecanizada con el objetivo de darle un acabado superficial y un dimensionamiento tolerante a la pieza original, estas medidas para maquinado varían entre 1.5 mm y 3 mm (1/16 in y ¼ in).

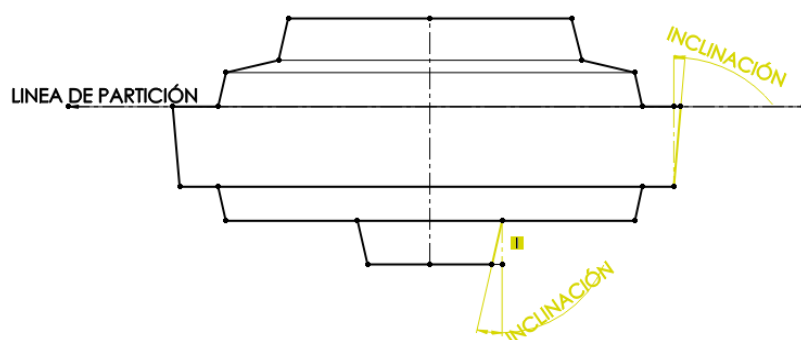


Figura 32 Bosquejo del molde externo.

Tabla 12

Contracción o dilatación volumétrica por solidificación para diversos metales fundidos.

CONTRACCIÓN O DILATACIÓN VOLUMÉTRICA POR SOLIDIFICACIÓN PARA DIVERSOS METALES FUNDIDOS.	
*Aluminio	7.1
Zinc	6.5
Al-4.5% de Cu	6.3
Oro	5.5
Hierro blanco	4-5.5
Cobre	4.9
Bronce (70-30)	4.5
Magnesio	4.2
90% de Cu-10% de Al	4

CONTINUA



Aceros al carbono	2.5-4
Al-12% de Si	3.8
Plomo	3.2
Dilatación (%)	
Bismuto	3.3
Silicio	2.9
Hierro gris	2.5

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008).

En base a estas consideraciones se realizó el CAD y los planos. Para la construcción del molde externo se utilizó madera de laurel, se lo mecaniza y cura con pintura anticorrosiva con el fin de evitar la deformación por humedad ver figura 33.



Figura 33 Molde externo.

4.2.1.2 Fabricación del Núcleo (Macho).

Para construir el molde del núcleo o macho como en el caso anterior se realizó el CAD y los planos pertinentes, se fabricaron algunas partes que no son complejas del molde en madera de laurel, las partes complejas y que ameritan mayor precisión se realizaron con impresión 3D en ABS, este tipo de molde debe ser desarmable con el fin de facilitar el moldeo del núcleo ver figura 34.



Figura 34 Molde del núcleo (macho).

Una vez construido el molde se procede a preparar y mezclar los materiales para moldear el núcleo, los cuales fueron los siguientes aglutinantes y aglomerantes:

- Arena silíceo 100%
- 0,75 a 0,8 % de dextrina.
- 1 a 2% de agua.
- 0,5% de resina.
- 2 a 4% de aceite de linaza.

Después se realiza el endurecimiento o curado en una mufla a una temperatura de 200° C en un tiempo aproximado de 2 horas. Este núcleo debe cumplir con una buena: resistencia a la manipulación, elasticidad y resistencia a la colada ver figura 35.



Figura 35 Elaboración del núcleo.

4.2.2 Sistema de alimentación.

El sistema de alimentación es el conductor del material en estado líquido a la cavidad del molde, el mismo que fue calculado adecuadamente para evitar rechupes y porosidad, para lo cual se debe considerar el peso del impulsor, de acuerdo al plano se tiene un peso de $G = 0,63 \text{ Kg}$.

A esta masa G se agrega un 25% para compensar la masa del sistema de alimentación, teniendo una masa total (G_t).

$$G_t = G * 1.25\%$$

$$G_t = 0.63 * 1.25$$

$$G_t = 0,79 \text{ Kg}$$

Existen parámetros que se debe calcular para el diseño del molde ver la figura 36.

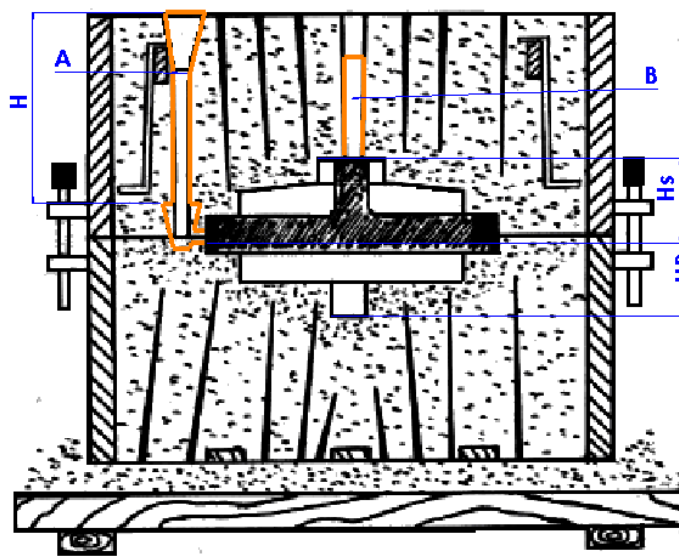


Figura 36 Esquemas de caja con molde para fundición.

4.2.2.1 Cálculo de las alturas del canal de alimentación.

Para el cálculo de la altura media (H_m) se utiliza la siguiente ecuación de acuerdo a los parámetros que me establece la gráfica anterior.

$$Hm = H - \frac{Hs^2}{2Hp}$$

Donde:

- Hm = altura media de carga (cm).
- H = 6 cm (altura del sistema de alimentación desde la posición de colado).
- Hs = 2.8 cm (altura del modelo desde la posición de la masa fundida).
- Hp = 8cm (altura de la pieza a fundir).

Entonces:

$$Hm = 6 - \frac{2.8^2}{2*8} = 5.51 \text{ cm}$$

4.2.2.2 Cálculo del tiempo de vaciado

$$\tau = Kt * \delta^n * G^m$$

Donde:

δ = espesor predominante.

G = masa del metal.

Kt, n y m coeficientes de corrección de acuerdo a la tabla 13.

δ Se obtiene de la tabla 14.

El espesor predominante es de la base superior del rodete:

$$\delta = 8 \text{ mm}$$

$$\tau = 1.42 * 9^{0.18} * 0.79^{0.5}$$

$$\tau = 1.42 * 1.49 * 1.12$$

$$\tau = 2.37 \text{ s}$$

Tabla 13**Coefficientes de corrección.**

TIPO DE ALEACIÓN	Kt	n	m
cero	1.47	0.21	0.34
Hierro Gris	0.76	0.23	0.5
Hierro maleable	1.89	0.43	0.5
Hierro nodular	0.97	0	0.5
*Aluminio	1.42	0.18	0.5
Bronce	0.47	0.2	0.5

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008)

Tabla 14**Coefficientes de Velocidad de colado.**

Espesor predominante δ, mm	hasta	10	20	40	Hasta 80 y más
Velocidad de colado se ascensos. Vca (s)		*1,0	1,35	1,5	1,7

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008)

4.2.2.3 Cálculo de áreas de la canal de alimentación

Conocido el esquema del canal de alimentación (figura 37), se realizó la relación entre el área del bebedero o canal vertical, área de distribución o escoriador, y el área de alimentación $A_b: A_d: A_a$.

Para este tipo de cálculo se tomó en cuenta valores de la tabla 15. Y la ecuación nos queda de esta manera:

$$A_b: A_d: A_a = 1:3:3.$$

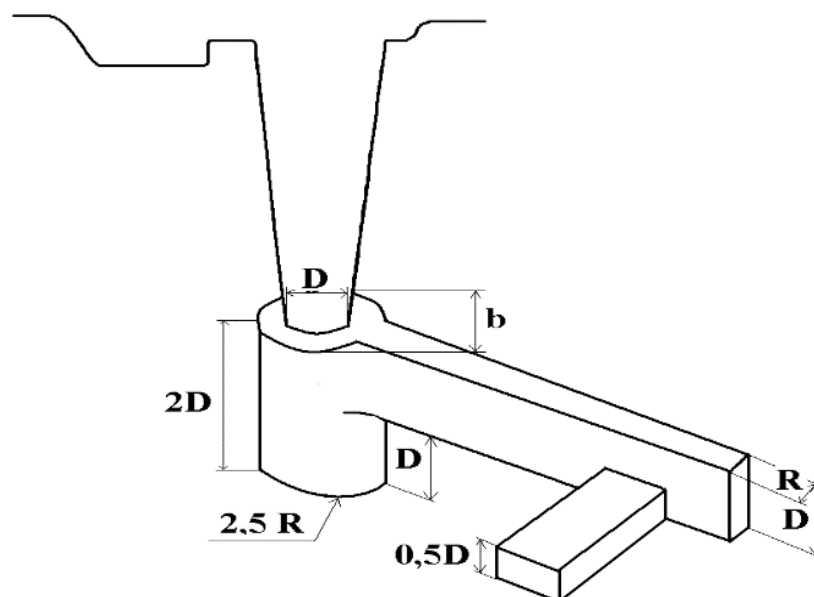


Figura 37 Canal de alimentación.

Tabla 15

Relaciones de colado.

ALEACIÓN	TIPO DE PIEZA	SISTEMAS	ALIMENTAD ORES	ESCORIA DOR	CANAL VERTICAL
Acero	Pequeñas	Con presión	1	1,1	1,2
			1	1,2	1,6
	Medias	Presión Parcial	1 1,5	1 1	1,05 1,2
	Grandes	Sin presión	1	1	1
			2	2	1
Hierro gris	Pequeñas y finas	Con presión	1	1,06	1,11
	Medianas y pequeñas	Con presión	1	1,1	1,15
	Grandes	Con presión	1	1,2	1,4
Hierro maleable		Sin presión	1,5		

CONTINUA



		1	2,7	1,3
Hierro nodular	Con presión	1	1,12	1,25
		4	2	2
Magnesio y aluminio	Sin presión	6	3	3
		*1	*3	*3
		2	4	4
Bronce	Con presión	1	1,3	1,6
Latones y bronces oxidables	Sin presión	1,5	0,6	1

Fuente: (GOYOS.L., 1994)

4.2.2.4 Cálculo del área de alimentación o de control.

$$Aa = \frac{G}{\mu 0.31 \tau \overline{Hm}}$$

Donde:

$$G = 0.79 \text{ kg}$$

$\mu = 0,34$ molduras con paredes de hasta 10 mm.

$$\tau = 3.019 \text{ s}$$

$$Hm = 5.51 \text{ cm}$$

$$Aa = \frac{0.79}{0.34 * 0.31 * 3.019 * \overline{5.51}}$$

$$Aa = 1.1 \text{ cm}^2$$

Entonces para el cálculo del diámetro realizamos la siguiente operación.

$$Aa = \pi R^2$$

$$R = \frac{\overline{1.1}}{\pi}$$

$$R = 0.35 \text{ cm}$$

$$D = 2 * R$$

$$D = 0.7 \text{ cm}$$

El diseño de la entrada o taza se hizo de forma cónica para evitar caída de presión de la colada como se muestra en la figura 38. Las repuestas de las áreas restantes se operan de la siguiente manera:

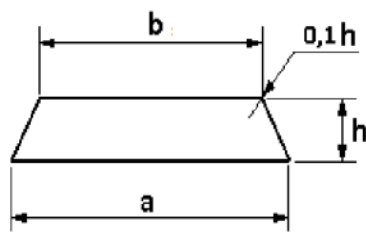
$$Ad: Aa = 3:3 \rightarrow \frac{Ad}{1.1} = \frac{3}{3}$$

$$Ad = 1.1 \text{ cm}^2$$

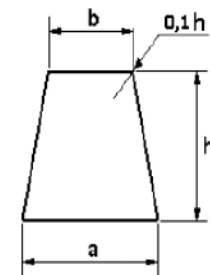
$$Ab: Ad = 1:3 \rightarrow \frac{Ab}{1.1} = \frac{1}{1}$$

$$Ab = 1.1 \text{ cm}^2$$

Una vez determinada las áreas se calcularon las siguientes secciones, las cuales se encuentran establecidas en las tablas 16 y 17 que tienen relación con las áreas calculadas.



Ataque



Canal de colada

Figura 38 Sección de canales de alimentación (ataque), distribución (colada)

Tabla 16

Dimensiones normalizadas de canales distribución.

	h= a			h=1, 25a			h=1, 5a		
Aa	Dimensiones [mm]								
(cm ²)	a	b	h	A	B	h	a	b	h

CONTINUA

1	11	8	11						
1,3	12	10	12	11	8	14			
1,6	14	10	14	12	9	15	11	7	17
2	15	12	15	14	10	17	12	8	20
2,5	16	13	17	15	11	19	14	10	21
3,15	18	14	19	16	12	21	15	11	23
4	22	18	21	18	13	25	18	13	26
5	24	19	24	22	16	27	20	14	30
6,3	26	20	27	24	18	30	23	16	34
8	30	24	30	26	19	35	24	17	38
10	34	28	33	30	22	38	28	20	42
12,5	38	30	37	34	26	43	30	22	47
16	42	34	42	38	29	48	36	25	54
20	48	38	47	42	32	53	40	28	60
25	52	42	53	48	36	60	44	32	66
31,5	60	48	59	52	40	66	50	35	75
40	66	52	67	60	45	77	56	39	84

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008)

Tabla 17

Dimensiones normalizadas de canales alimentación.

Aa (cm²)	h = 0,5 a		
	A	b	h
1,0	15,0	12,0	7,5
1,5	18,0	15,5	9,0
2,0	22,0	18,0	11,0
2,5	24,0	20,0	12,0
3,0	26,0	22,0	13,0
3,5	28,0	23,0	14,0

CONTINUA 

4,0	30,0	24,0	15,0
4,5	31,0	28,0	15,5
5,0	33,0	28,0	16,5
5,5	35,0	29,0	17,5
6,0	36,0	31,0	18,0
6,5	37,0	32,0	18,5
7,0	38,0	33,0	19,0

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008).

4.2.2.5 Cálculo de la mazarota.

En la figura 36 se observa el esquema de la caja de moldeo donde se identifica la mazarota (punto **B** forma cilíndrica), la misma que ayudara a evitar rechupes en la pieza; se calcula de acuerdo al siguiente criterio:

$$VMm = VPpg * C * K$$

Donde:

VMm: Volumen mínimo de la mazarota.

VPpg: volumen de las partes gruesas de la pieza (11198.76 mm³ dato del software)

C: coeficiente de contracción. (Aluminio 7.1% de acuerdo a la tabla 14)

K: coeficiente de seguridad. (Normalmente es 2)

Entonces:

$$VMm = 11198.76 \text{ mm}^3 * 7.1 \% * 2$$

$$VMm = 159022.39 \text{ mm}^3.$$

Ya que la forma de la mazarota es de forma cilíndrica tendrá la siguiente relación:

H = 2D, ver figura 39.

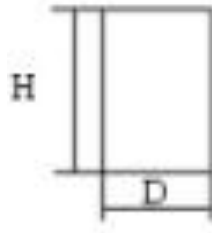


Figura 39 Forma cilíndrica de la mazarota.

Para el cálculo del diámetro partimos del volumen del cilindro.

$$V = H\pi r R^2$$

$$V = VMm.$$

$$R = D/2$$

Entonces:

$$D = \sqrt[3]{\frac{2V}{\pi}}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{2(159022.39 \text{ mm}^3.)}{\pi}}$$

$$D = 46.6 \text{ mm.}$$

$$H = 93.21 \text{ mm.}$$

4.2.3 Moldeo y colado.

Se prepara la arena se en un tamiz N° 8, luego se procede al moldeo de la parte externa, para luego colocar el núcleo como se muestra en la figura 39 (a y b). Una vez que el colado ya está en el punto de fusión se vierte, después de un tiempo se separa el modelo en bruto de la caja ver figura 39 (c y d).



Figura 40 Proceso de fundición: a) moldeo de la cavidad externa, b) ubicación del núcleo, c) fusión del aluminio, d) producto en bruto del impulsor.

4.3 Limpieza y desbaste de la pieza fundida.

Una vez ya solidificada la pieza (impulsor en bruto) es necesario limpiarla y mecanizarla para quitarle las escorias de la fundición, desbastándola hasta que obtenga una tolerancia adecuada para realizar el siguiente proceso.

Una vez fundida la pieza se realiza un tratamiento térmico de una forma sencilla.

T7: Tratamiento térmico de solución, temple y sobre-maduración / estabilizado

4.4 Torneado CNC.

Se realiza el mecanizado en el torno de control numérico o CNC, por tener mayor eficiencia en el mecanizado de revolución la cual requiere el rodete, la operación del

torneado se realiza de acuerdo a las tolerancias especificadas en los planos (anexo 2B,2C).

El proceso de Torneado se realiza Longitudinal y de perfilado se toma en consideración la recomendación del catálogo KORLOY, el cual establece una plaquita de DP150, esta desbasta y da el acabado superficial de materiales no férricos ver el anexo 3.

4.4.1.1 Cálculos de los parámetros de corte.

Datos para el desbaste recomendados:

- Avance (f_n) = 0,2 mm/rev.
- Velocidad de corte (V_c) = 300 m/min
- Diámetro $d = 135$ (mm)
- Profundidad de pasada $a_p = 3$ (mm)
- Presión de corte $K_{c1} = 500$ N/mm²

Revoluciones por minuto (n):

$$n = \frac{V_c * 1000}{\pi * D}$$

$$n = \frac{300 * 1000}{\pi * 135} (rpm)$$

$$n = 707 (rpm)$$

Velocidad de avance (V_s):

$$V_s = n * f_n$$

$$V_s = 707 * 0,2 (mm/min)$$

$$V_s = 141.4 (mm/min) \approx 150 mm/min$$

Velocidad de arranque del metal Q :

$$Q = V_c * a_p * f_n$$

$$Q = 300 * 3 * 0,2$$

$$Q = 180 \text{ m}^3/\text{min}$$

Tiempo de mecanizado del desbaste T_{m1} :

$$T_{m1} = N_p * \frac{L_m}{f_n * n}$$

$L_m = 969$ mm longitud a mecanizar.

$N_p = 3$ número de pasadas.

$$T_{m1} = 3 * \frac{969 \text{ mm}}{\frac{0.2 \text{ mm}}{\text{rev}} * 707 \text{ rev}}$$

$$T_{m1} = 20.61 \text{ min} = 0.34 \text{ hrs.}$$

Datos para el acabado superficial del impulsor:

- Avance (f_n) = 0,15 mm/rev.
- Velocidad de corte (V_c) = 700 m/min
- Diámetro $D = 132$ (mm)
- Profundidad de pasada $a_p = 0.5$ (mm)
- Presión de corte $K_{c1} = 500$ N/mm²

Revoluciones por minuto (n):

$$n = \frac{V_c * 1000}{\pi * D}$$

$$n = \frac{700 * 1000}{\pi * 132} \text{ (rpm)}$$

$$n = 1688 \text{ (rpm)}$$

Velocidad de avance (V_s):

$$V_s = n * f_n$$

$$V_s = 1688 * 1(\text{mm}/\text{min})$$

$$V_s = 1688 (\text{mm}/\text{min}) \approx 1700 \text{ mm}/\text{min}$$

Velocidad de arranque del metal Q :

$$Q = V_c * a_p * f_n$$

$$Q = 700 * 1 * 0.15$$

$$Q = 105 \text{ m}^3/\text{min}$$

Tiempo de mecanizado del acabado superficial T_{m2} :

$$T_{m2} = N_p * \frac{l_m}{f_n * n}$$

$l_m = 950$ mm longitud a mecanizar.

$N_p = 2$ número de pasadas.

$$T_{m2} = 2 * \frac{950 \text{ mm}}{\frac{0.15 \text{ mm}}{\text{rev}} * 1688 \frac{\text{rev}}{\text{min}}}$$

$$T_{m2} = 7.5 \text{ min} = 0.13 \text{ hrs.}$$

Tiempo total de mecanizado en torno (T_{tt}).

$$T_{tt} = T_m + T_s + T_d.$$

Donde:

$T_s = 0.25$ horas (tiempo de preparación de la máquina).

$T_d = 0.03$ horas (tiempo cambio o afilado de herramienta).

$$T_m = T_{m1} + T_{m2}.$$

$$T_m = 0.34 \text{ hrs} + 0.13 \text{ hrs}$$

$$T_m = 0.47 \text{ hrs}$$

$$T_{tt} = (0.45 + 0.25 + 0.03) \text{ hrs.}$$

$$T_{tt} = 0.85 \text{ hrs} = 51 \text{ min.}$$

Los parámetros de corte se organizan a continuación en la tabla 18.

Tabla 18

Parámetros de corte por pieza en el torno.

PARÁMETROS DE CORTE POR PIEZA EN EL TORNO.							
Operación	Hmta. (Útil)	f	Vc	ap	Rpm	Tm	Ttt.
		(mm/rev.)	(m/min)	mm		horas	horas
Desbaste.	DP150	0.2	300	3	943	0.34	0.85
Acabado.	DP150	0.15	700	0.5	1688	0.13	

4.4.1.2 Simulación del mecanizado CAM (Torno).

Una vez calculado los parámetros de desbaste y acabado se cargan estos datos al programa CAM (Solidcam), se prepara el CAD del impulsor al cual se añade material extra (stock), para luego proceder con la simulación del mecanizado. Ver figura 41.

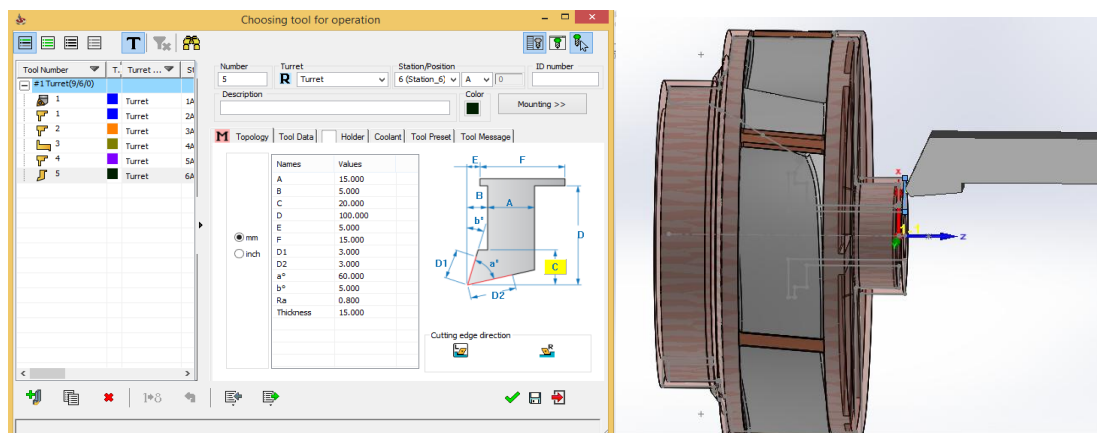


Figura 41 Simulación de torneado (CAM).

Verificando que la simulación CAM es factible se procede a la generación de código para luego realizar la operación de mecanizado en torno CNC como se muestra en la figura 42.



Figura 42 Torneado del impulsor.

4.5 Fresado

El fresado se realiza en las zonas donde el torno no pudo ejecutar el mecanizado, de igual forma que en la operación anterior se efectúa la selección de la herramienta (fresas) para luego proceder con el cálculo de los parámetros de corte para el desbaste y acabado del impulsor.

4.5.1 Cálculos de los parámetros de corte

Los parámetros se trabaja de acuerdo al tipo de maquina fresadora ROMI (6-6000 RPM) para este caso se trabaja sin refrigerante con los siguientes parámetros:

Datos para el perfilado:

- Velocidad de corte (V_c) = 60 m/min
- Número de dientes de la herramienta (Z) = 2
- Avance por diente (a_z) = 0.125 mm/min
- Diámetro (D) = 5 mm

Revoluciones por minuto (n):

$$n = \frac{1000V_c}{\pi D}$$

$$n = \frac{1000 * (60\text{m/min})}{\pi * 5\text{ mm}}$$

$$n = 3819,71\text{ rpm}$$

Velocidad de avance (Vs):

$$V_s = a_z * z * n$$

$$V_s = 0.125 * 2 * 3819,71$$

$$V_s = 954.927\text{ mm/min}$$

Tiempo de mecanizado Tm3:

$$T_{m3} = N_p * \frac{L_m}{V_s}$$

Donde:

Lm = 1560 mm longitud a mecanizar.

Np = 4 número de pasadas.

$$T_{m3} = 4 * \frac{1560\text{mm}}{954.927\text{ mm/min}}$$

$$T_{m3} = 6.53\text{ min} = 0.11\text{ hrs.}$$

Datos para el acabado:

- Velocidad de corte (Vc) = 200 m/min
- Número de diente de la herramienta (Z) = 2
- Avance por diente (az) = 0.21 mm/min
- Diámetro (D) = 6 mm.

Revoluciones por minuto (n):

$$n = \frac{1000Vc}{\pi D}$$

$$n = \frac{1000 * (90\text{m/min})}{\pi 6\text{mm}}$$

$$n = 4774,64\text{rpm}$$

Velocidad de avance (Vs):

$$Vs = fz * z * n$$

$$Vs = 3183.09 * 2 * .021$$

$$Vs = 2005.35\text{mm/min}$$

Tiempo de mecanizado Tm4:

$$Tm4 = Np * \frac{lm}{Vs}$$

Lm = 185 mm longitud a mecanizar.

Np = 2 número de pasadas.

$$Tm4 = 2 * \frac{185 \text{ mm}}{954.927 \text{ mm/min}}$$

$$Tm4 = 0.39 \text{ min} = 0.01\text{hrs}$$

Tiempo total de mecanizado en la fresadora. (Ttf).

$$Ttf = Tmf + Tsf + Tdf.$$

Donde:

Tsf = 0.25 horas (tiempo de preparación de la máquina).

Tdf = 0.03 horas (tiempo cambio o afilado de herramienta).

$$Tmf = Tm3 + Tm4.$$

$$Tmf = 0.11 \text{ hrs} + 0.1\text{hrs}$$

$$Tmf = 0.12 \text{ hrs}$$

$$Ttf = (0.12 + 0.25 + 0.05) \text{ hrs.}$$

$$T_{tf} = 0.42 \text{ hrs} = 25.2 \text{ min.}$$

Los parámetros de corte de la fresadora se organizan a continuación en la tabla 19.

Tabla 19

Parámetros de corte por pieza en la fresadora.

OPERACIÓN	Hmta. (Útil)	az (mm/rev.)	Vc (m/min)	Rpm	Tmf horas	Ttf. horas
Desbaste.	H10.	0.13	60	3820	0.11	0.42
Acabado.	H10.	0.21	1000	4775	0.01	

4.5.2 Simulación mecanizado.

Para lo efecto se utiliza Solidcam, donde se cargaron los datos calculados para proceder con la simulación tanto del perfilado como del acabado.

Para efectuar el perfilado se realizó la selección la herramienta (fresa plana de 2 dientes con un diámetro de 5 mm), y con una estrategia de tipo espiral que desde perfile desde adentro hacia fuera ver figura 42.

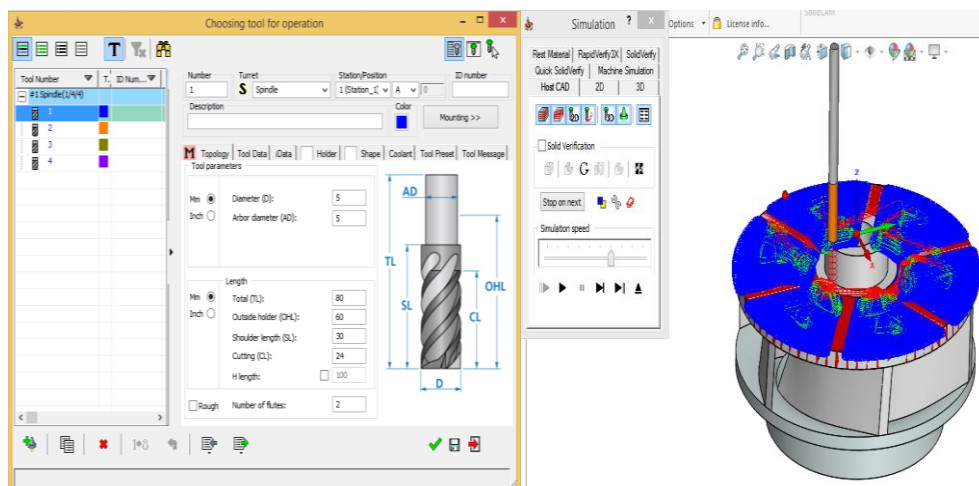


Figura 43 Simulación del perfilado.

Para realizar el acabado de igual manera se utilizó un procedimiento cambiando el tipo de herramienta (fresa redonda de 2 dientes y diámetro de 6mm) y la estrategia será la misma del perfilado con parámetros de corte diferentes ver figura 44.

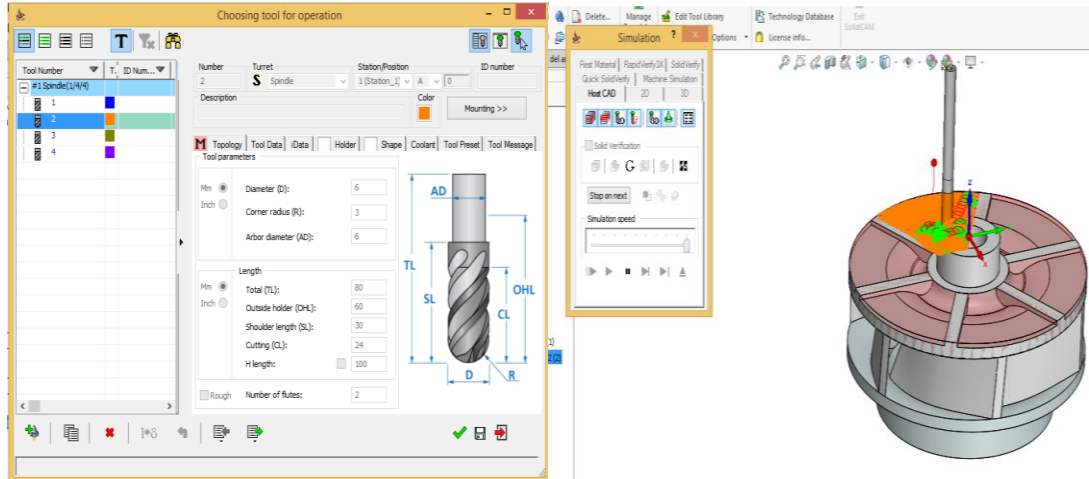


Figura 44 Simulación del acabado.

Se verificó que la simulación de fresado no tenga ningún inconveniente en su operación, para luego proceder a la generación de código y enviarlo a la máquina CNC para mecanizarlo de acuerdo a las medidas del plano. Ver figura 45.



Figura 45 Fresado del impulsor.

CAPÍTULO V

VALIDACIÓN DE RESULTADOS DEL PROTOTIPO.

Para validar el prototipo del impulsor deben efectuarse algunos análisis, los mismos que se deben regir a especificaciones o normas técnicas, como se encuentra detallado en la tabla 20.

Tabla 20

Análisis y pruebas del prototipo.

ANÁLISIS Y PRUEBAS DEL PROTOTIPO		
ANÁLISIS	NORMA TÉCNICA.	ESPECIFICACIÓN TÉCNICA
Ensayo de materiales.	-----	Procedimiento de laboratorio de materiales.
Evaluación de Dimensiones lineales	ISO 2768.	Planos constructivos.
Balaceo estático.	ISO 1861.1	Procedimiento de las cartas de Charlot
Prueba hidráulica.	ISO 9006	
Costos.	-----	Ministerio de relaciones laborales, salarios mínimos sectoriales 2017

5.1 Ensayo de materiales.

Se levanta dos tipos de ensayos al material con el que fue manufacturado el prototipo, estos son:

- Ensayo químico. (ver anexo 4)
- Ensayo de dureza Brinell.

5.1.1 Ensayo químico para el A206.0 T7.

Se elabora en un espectrómetro de acuerdo al procedimiento de laboratorio de materiales ejecutado en la ESPOCH en el cual se analiza la composición química del material y se obtiene los siguientes datos mostrados en la tabla 21.

Tabla 21.

Composición química del Aluminio A206.0 T7

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE AL-A206.0 T7		
MÉTODO: FE100		
Material	Variable	Concentración %
Silicio	Si	0.76
Hierro	Fe	0.72
Cobre	Cu	3.56
Manganeso	Mn	0.02
Magnesio	Mg	0.07
Cromo	Cr	0.01
Níquel	Ni	0.14
Zinc	Zn	0.14
Titanio	Ti	0.01
Plomo	Pb	0.05
Estaño	Sn	0.01
Vanadio	V	0.003
Estroncio	Sr	0.002
Circonio	Zr	0.002
Cadmio	Cd	0.01
Cobalto	Co	0.003
Boro	B	0.001
Plata	Ag	0.001
Bismuto	Bi	0.01
Calcio	Ca	0.06
Aluminio	Al	96.59

5.1.2 Ensayo de dureza Brinell para el A206.0 T7.

Este ensayo se realiza en el durómetro, es un método por indentación, donde se fuerza una bola de acero en la superficie del material del A206.0 T7, se mide el diámetro impreso y se calcula la dureza mediante la siguiente fórmula:

$$HB = \frac{2P}{\pi D^2} \frac{1}{1 - \frac{1 - \frac{d^2}{D^2}}{1 - \frac{d^2}{D^2}}}$$

Donde:

P: 187.5 Kgf (carga a utilizar medida).

D: 5 mm (diámetro de la bola (indentador)).

d: 1.33 mm (diámetro de la huella en superficie).


$$HB = \frac{2(187.5 \text{ kgf})}{\pi 25 \text{ mm}^2} \frac{1}{1 - \frac{1 - \frac{1.77 \text{ mm}^2}{25 \text{ mm}^2}}{1 - \frac{1.77 \text{ mm}^2}{25 \text{ mm}^2}}}$$

$$HB = 131.98 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2} = Hv \text{ (dureza vicker).}$$

Tabla 22

Datos de ensayo y datos técnicos del A206.0T7.

MATERIAL Y CARACTERÍSTICAS.	A206.0 T7 (Datos de ensayo).	A206.0 T7 (Datos técnicos por catálogo)
Composición química principal	96.59 % AL	99,2 – 99,6 % AL
	0.72 % Cu	4.2 – 5 % Cu
	0.7 % Fe	0 – 0,1 % Fe
	0.1 % Mg	0.15 – 0,35 % Mg

CONTINUA 

	0.02 % Mn	0.2 – 0, 5 % Mn
	0.04 % Ni	0 – 0.05 % Ni
	0.8 % Si	0 – 0.05 % Si
	0.01 % Sn	0 – 0.05 % Sn
	0.1 % Ti	0.15 – 0.3 % Ti
	0.14 % Zn	0 – 0.15 % Zn
Dureza	131.98 HV	130 – 149 HV

5.2 Evaluación de Dimensiones lineales.

Para verificar el control de calidad de las dimensiones lineales, se hace uso de un calibrador pie de rey que junto a los planos de construcción del impulsor (ver anexo 2), se determinan los datos y analiza las desviaciones existentes ver tabla 23.

Tabla 23

Evaluación dimensional del impulsor.

EVALUACIÓN DIMENSIONAL DEL IMPULSOR.							
NO	DETALLE	MEDIDA NOMINAL	MEDIDA REAL	TOLERANCIA (mm)	SI CUMPLE	NO CUMPLE	DESVIA CIÓN
	Diámetros						
1	A	50,79	50,79	±0.5	√	-----	-----
2	B	84,04	84,04	±0.5	√	-----	-----
3	C	131	130.65	±0.5	√	-----	-----
4	D	103,22	104	±0.5	√	-----	-----
5	E	98.80	99.13	±0.5	√	-----	-----
6	F	34,58	34.41	±0.5	√	-----	-----
7	G	20.00	20.04	H7(+0.013)		X	+0,028
8	H	41,45	34.46	±0.5	√	-----	-----
9	I	88,65	88.20	±0.18	-----	X	-0.45
11	J	21	20.5	+0.6 -0.2	√	-----	-----
12	K	13.5	13.2	+0.40 -0.13	√	-----	-----

CONTINUA 

	LONGUIT UD	MEDIDA NOMINAL	MEDIDA REAL	TOLERANCIA	SI CUMPLE	NO CUMPLE	DESVIA CÓN
12	MD	76.70	76.54	±0.5	√	-----	-----
13	md1	61,67	61.83	±0.5	√	-----	-----
14	md2	14.20	30.35	±0.5	√	-----	-----
15	md3	16,47	16.84	±0.5	√	-----	-----
16	md4	28	28.33	±0.5	√	-----	-----
17	md5	34,35	33.85	±0.5	√	-----	-----
18	md6	5,0	5.07	±0.5	√	-----	-----
19	md7	5,50	5.33	±0.5	√	-----	-----
20	md8	2.05	2.01	±0.2	-	X	-0,4
	CHAVET ERO						
25	md9	6.21	6.87	±0.1	-	X	+0.65
26	md10	3	3.13	±0.1	-	X	+0.12
	ÁLABE						
23	md11	26,11	28.34	±0.5	√	-----	-----
24	e	5	5.20	±0.5	√	-----	-----

Comparando la tabla 24 las tolerancias permitidas entre las dimensiones nominales y reales se constata, se determina que existe cinco desviaciones, (G, I, md8, md9, md10) estas desviaciones podrían afectar al funcionamiento de impulsor y causar daños en la bomba.

5.3 Evaluación de vibraciones.

Para efectuar el análisis de vibración se constata que el peso del impulsor sea el correcto y uniforme, se evalúa el peso, lo cual se realiza en una balanza digital, el resultado se compara con el peso registrado en el plano del impulsor o del software como muestra en las figura 46 (a, b).

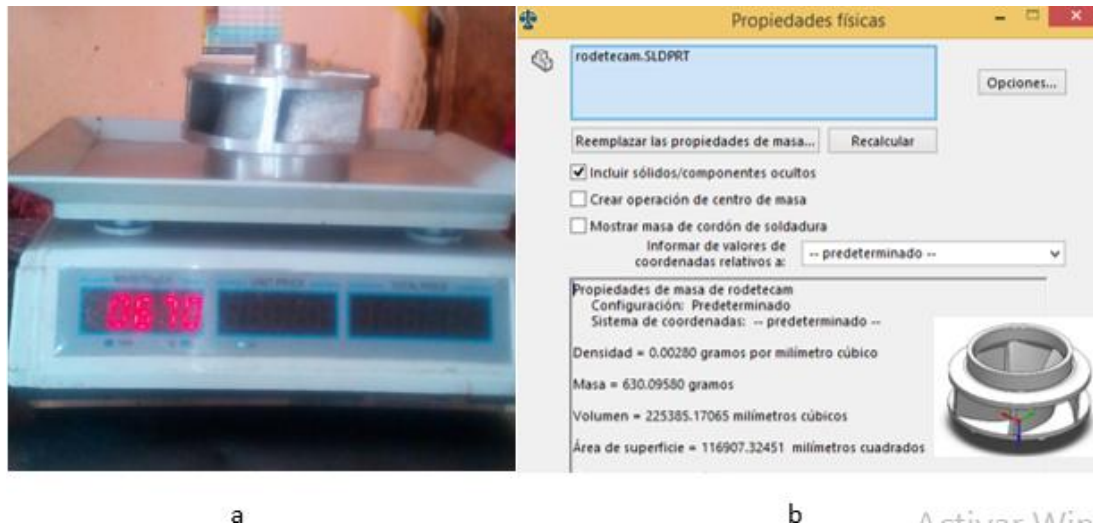


Figura 46 a) Peso Nominal, b) Peso Real.

Se tiene el peso nominal (P_n) el cual es de 0.67 Kg a diferencia del peso real (P_r) que es de 0.63 Kg, esta diferencia de masa se analiza y verifica que no afecte al desempeño de la pieza.

De acuerdo con la siguiente ecuación se calcula el porcentaje de error:

$$E_a = P_n - P_r$$

$$E_r = \frac{E_a}{P_n} * 100\%$$

Donde:

E_a = Error Absoluto.

E_r = Error relativo.

Entonces tenemos:

$$P_n = 630.10 \text{ gr.}$$

$$P_r = 0.670 \text{ Kg} = 670 \text{ gr.}$$

$$E_a = 630.10 - 670$$

$$E_a = 39.90 \text{ gr.}$$

$$E_r = \frac{39.90}{630.10} * 100\%$$

$$E_r = 6.33 \%$$

Del resultado se puede concluir, que es admisible siempre y cuando este peso en demasía, este distribuido uniformemente en la pieza para que no afecte el balanceo de la misma.

5.3.1 Ensayo de vibración.

Una de las partes importantes es verificar que el rodete no se encuentre desbalanceado, para lo cual se realizó un ensayo de vibraciones con los siguientes equipos e instrumentos:

- Torno con 2000 rpm
- Tacómetro digital.
- El vibra check.
- Software Main trog Viewer 3.1.

El software ayudó a detectar las variaciones de frecuencia, el cual debe indicar alteraciones en el equipo, como primer paso se puede realizar una prueba en el torno a su máxima capacidad de trabajo 2000 rpm donde se verifica que funcione sin anomalías (vibraciones).



Figura 47 Comprobación del equipo y máquina herramienta.

Se verifica que el equipo esté trabajando normalmente, para proceder a montar el impulsor y determinar si existe un desequilibrio de masa, de acuerdo con lo que establece las cartas de Charlotte (anexo 5), se podría presentar un desequilibrio dinámico que es el más frecuente (combinación del par y el desequilibrio estático), En la gráfica se indica que si en el ensayo sobrepasa los límites en 1x, 2x y 3x se presentarían desequilibrio, desalineación y holguras de acuerdo con la norma ISO 1861-1.

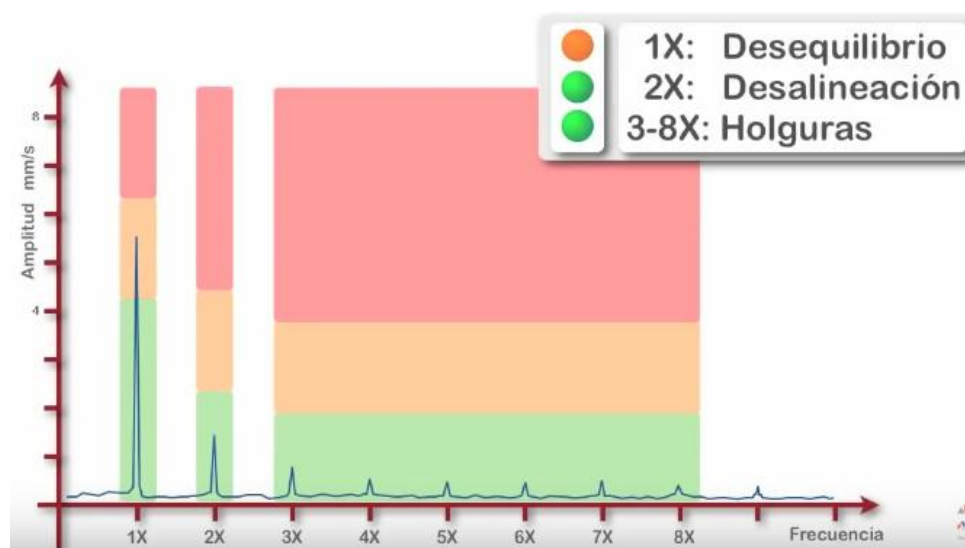


Figura 48 Amplitud vs frecuencia.

La norma la ubica por clases (I, II, III, IV) a los equipos (motor de la bomba) de acuerdo a sus especificaciones técnicas de operación.

Los parámetros del motor de la bomba son los siguientes:

- Hp = 14.3
- Rpm = 2900.
- KW = 11

Entonces de acuerdo al parámetro de la bomba y la norma ISO 1861-1 se determina que se encuentra en Clase I. donde están motores que trabajan hasta 15 KW. La tabla 24 a continuación describe los límites típicos de acuerdo a la clase que esté especificado el motor que podrá tener un desequilibrio de hasta 0.71 R.m.s.

Tabla 24

Límites de clase de vibración.

R.M.S. VIBRACIÓN Y VELOCIDAD mm/s	CLASE I	CLASE II	CLASE III	CLASE IV
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71	B	B	B	A
1,12				
1,8	C	C	C	B
2,8				
4,5	D	D	D	C
7,1				
11,2	D	D	D	D
18				
28				
45				

Una vez constatados los datos, se procede a montar el impulsor en el torno para realizar el ensayo y adquirir los datos para luego ser comparados y analizados. Ver figura 49.



Figura 49 Ensayo de vibración con el impulsor.

Los datos que se obtuvieron fueron espectros generados por el impulsor, son de una amplitud RMS de 0.645 mm/s, como se muestra en la figura 50.

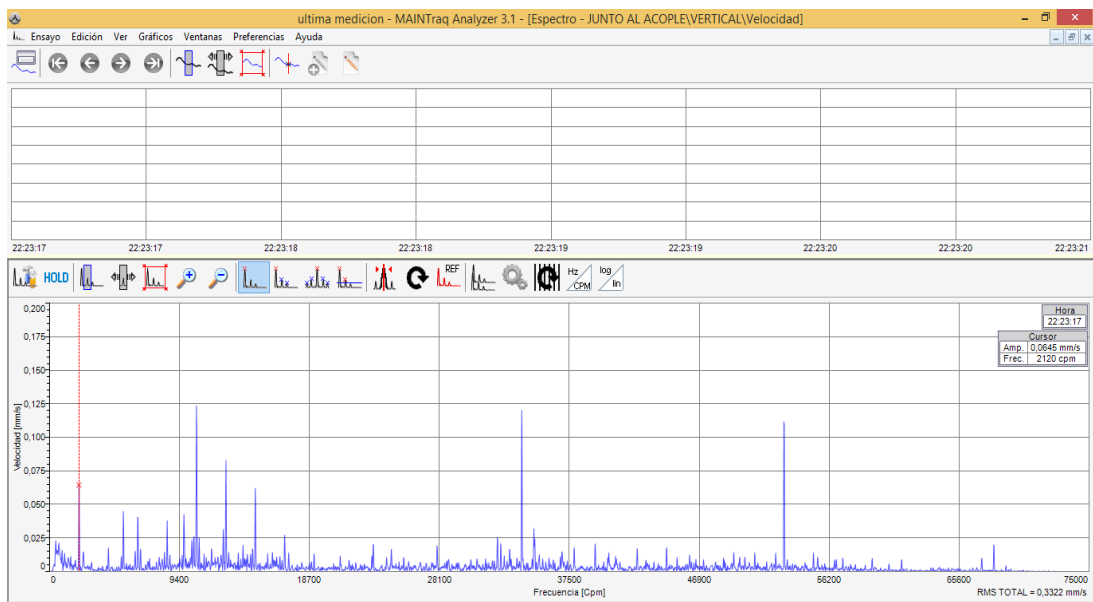


Figura 50 Amplitud y frecuencia del rodete.

Se puede concluir que este valor (0.65 R.M.S) está dentro del rango establecido por la norma, por tanto el impulsor no se encuentra desbalanceado y no debe presentar anomalías en el funcionamiento del equipo.

5.4 Prueba de funcionamiento del Impulsor.

Una vez verificadas las tolerancias y el balanceo del impulsor, se procede a la prueba de funcionamiento, que sería el montaje del rodete en el equipo (bomba centrífuga).

El procedimiento es establecido por el personal de mantenimiento del área ELPO de la empresa CIAUTO.

El primer paso fue tomar los datos de funcionamiento cuando la bomba trabaja con el impulsor original o nominal ver figura 51. Lo siguiente fue montar el prototipo y registrar los nuevos datos de funcionamiento para ser comparados y evaluados.



Figura 51 Circuito de flujo de bombeo.

Finalmente se evaluó los datos y se concluye que la bomba tuvo una mejor eficiencia de trabajo con el prototipo, ya ha que ganado un 0.2 Mpa presión durante la prueba, ver tabla 25.

Tabla 25

Comparación de datos de trabajo entre el impulsor original y el prototipo.

COMPARACIÓN DE DATOS DE TRABAJO ENTRE EL IMPULSOR ORIGINAL Y EL PROTOTIPO.					
Impulsor Nominal (original)					
PUNTOS	1	2	3	4	5
Presión de descarga MPA	0.24	0.241	0.24	0.24	0.24
Caudal Q (m ³ /h)	1.38	36.60	67.21	85.68	99.5
Altura Z (m)	20	16	12	10	5
Impulsor Real (prototipo)					
Presión de descarga MPA	0.26	0.26	0.250	0.25	0.26
Caudal Q (m ³ /h)	1.45	36.88	68.26	86.25	99.75
Altura Z (m)	20	16	12	10	5

5.4.1 Análisis hidráulico.

La norma ISO 9906 especifica las pruebas de rendimiento hidráulico para la aceptación por parte de los clientes de bombas (centrífugas, de flujo mixto y axial). Esta norma puede aplicarse a bombas que trabajen bombeando líquidos que se comporten como agua limpia y que tengan una adecuada temperatura. Además establece dos grados de exactitud: grado 1 (mayor exactitud) y grados 2 (menor exactitud) como se indica en la tabla 26.

Tabla 26**Valores de factores de tolerancia.**

Cantidad	Símbolo	Grado 1 %	Grado 2 %
Caudal	Q	± 4.5	± 8
Altura de la bomba (cabeza)	H	± 3	± 5
Eficiencia de la bomba	η	-3	-5

Fuente: (ISO 9906 1999).

Los datos de garantía (Q/H) que proporcionan el fabricante /proveedor de la bomba se compara con los datos que son medidos y calculados en un ensayo.

5.4.1.1 Cálculo de parámetros de la bomba.

Con los datos tomados en la prueba en situ (tabla 16) se realiza el cálculo de los siguientes parámetros:

Velocidad media

- Valor medio de la velocidad axial de flujo, viene dado por:

$$U = \frac{Q}{A}$$

Donde:

Q= 1.38 m³/h (el valor esta dado en la tabla 19).

Área:

$$A = \pi r^2$$

r = 50,56 mm

A = 8059.53 mm²

$$U = 1,71E - 10 \text{ m/s}^2$$

Altura total.

$$Hx = Zx + \frac{Px}{\delta} + \frac{U^2}{2g}$$

Donde:

Hx = altura total.

Px = 0,24 MPA = 2.4 BAR (presión de descarga ver tabla 19)

Zx = 20 m (altura del centro de la sección transversal por encima del plano de referencia Y).

δ = 1050 kg/m³ (densidad)

Entonces:

$$Hx = 20 + \frac{2.6}{1050} + \frac{(1,71E - 10)^2}{2(9.8)}$$

$$Hx = 20,02 \text{ m}$$

La siguiente tabla indica los resultados de las pruebas ejecutadas, además registran los datos de garantía de la bomba (datos del fabricante), donde se realizará el análisis y comparación entre el impulsor nominal y real. Ver tabla 27.

Tabla 27

Análisis de datos del impulsor (nominal y real) con los datos de garantía (fabricante)

DATOS DE LA PRUEBA DE ANALISIS HIDRÁULICO DE LA BOMBA			
ESPECIFICACIONES DE LA BOMBA			
Tipo: YE2-160 M1-2	Velocidad (RPM) 2900	Potencia (KW) 11	diámetro del impulsor(mm) 131

CONTINUA 

CONDICIÓN PARA LA PRUEBA

Gravedad (m/s ²)	Densidad(Kg/m ³)	Succión diámetro de la tubería (mm-plg)
9.8	1050	101.6 mm 4 plg

Descarga diámetro de la tubería.	Medida de la altura de succión (mm).	Medida de la altura de descarga (mm).
101.6 mm (4 plg)	0.00	20000

DATOS DE GARANTÍA DEL FABRICANTE

Puntos	1	2	3	4	5
Caudal (m ³ /h)	0.00	40.00	60	80	100
Altura (m)	20.00	16.25	12.5	8.75	5

DATOS MEDIDOS CON EL IMPULSOR ORIGINAL (NOMINAL)

Puntos de prueba	1	2	3	4	5
Caudal Q (m ³ /h)	1.38	36.60	67.21	85.68	99.5
Presión de descarga P _x (BAR)	2.4	2.41	2.421	2.39	2.401
Altura Z (m)	20	16	12	10	5

DATOS CALCULADOS CON EL IMPULSOR ORIGINAL (NOMINAL)

Velocidad (m/s)	1,716E-10	4,96E-09	7,44E-09	2,75E-12	1,24E-08
Altura total(m)	20,02	16,02	12,02	8,32	5,02

DATOS MEDIDOS CON EL IMPULSOR REAL (PROTOTIPO)

Puntos de prueba	1	2	3	4	5
Caudal Q (m ³ /h)	0	38.5	62.45	82.25	99.75
Presión de descarga P _x (BAR)	2.6	2.55	2.50	2.54	2.56
Altura Z (m)	20	16	12.3	8.3	5

DATOS CALCULADOS CON EL IMPULSOR REAL (PROTOTIPO)

Velocidad (m/s)	0,000171	0,00477	0,00774	0,0102	0,0123
Altura total(m)	20,02	16,02	12,32	8,32	5,02

El diagrama que se presenta a continuación refleja una desviación por parte de la curva real (prototipo), con respecto a los datos de garantía (fabricante) los datos como del caudal y altura se comparan y se identifican en qué grado de aceptación están sus valores. Ver figura 52.

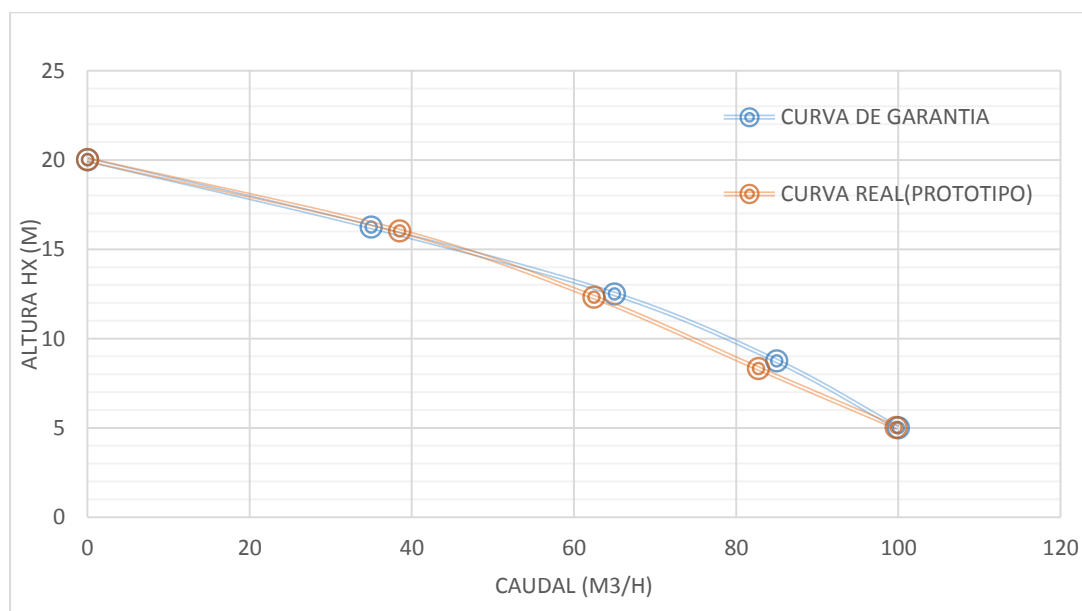


Figura 52 Curvas altura vs caudal, entre datos de garantía (fabricante) y datos del impulsor real (prototipo)

Tabla 28

Tolerancia del caudal entre los datos de garantía y los calculados del prototipo

NO	DATOS DE GARANTÍA DEL CAUDAL (M3/H)	DATOS DEL CAUDAL CALCULADOS DEL IMPULSOR REAL (PROTOTIPO) (M3/H)	TOLERANCIA DE ACUERDO AL GRADO 2 (MM)	DESVIACIÓN	CUMPLE
1	0.00	0	0	-----	√
2	40.00	38.5	2.8	-----	√
3	60.00	62.45	5.2	-----	√
4	80.00	82.25	6.8	-----	√
5	100.00	99.75	8	-----	√

Tabla 29**Desviación de la altura entre los datos de garantía y los calculados del prototipo.**

NO	DATOS DE GARANTÍA DE LA ALTURA (m)	DATOS DE LA ALTURA CALCULADOS IMPULSOR REAL (PROTOTIPO) (M3/H)	TOLERANCIA DE ACUERDO AL GRADO 2 (MM)	DESVIACIÓN	CUMPLE
1	20.00	20,02	1	-----	√
2	16.25	16,02	0.81	-----	√
3	12.5	12,32	0.62	-----	√
4	8.75	8,32	0.44	-----	√
5	5	5,02	0.25	-----	√

En la tabla 28 y 29 se demuestra que no existe ninguna desviación (fuera de la tolerancia) en los datos del caudal como los de la altura encontrándose en un grado 2 de tolerancia de acuerdo a la norma ISO 9906.

5.5 Costos.

Los costos a analizar son en base al prototipo, los cuales van desde el diseño hasta la producción con el fin de saber si es conveniente fabricar el producto, para lo cual se analiza los siguientes puntos:

- Costos del desarrollo del producto.
- Costos de producción.

5.5.1 Costos del desarrollo del producto.

Son los que intervienen directamente en la investigación y desarrollo del producto (prototipo del impulsor) el presupuesto propone de la siguiente manera:

5.5.1.1 Costos de Investigación.

Es el análisis de los valores de cada punto del proyecto de acuerdo a su tiempo invertido en la parte investigativa, los cuales se describen en la tabla 30.

Tabla 30

Costos de investigación.

COSTOS DE INVESTIGACIÓN.			
Detalle.	Tiempo (horas)	Costo por hora (dólares)	Costo Total \$
Recopilación de información.	320.00	8.00	2560.00
Desarrollo del prototipo conceptual.	160.00	8.00	1280.00
Simulación y análisis estático (CAE).	80.00	8.00	640.00
Planos de construcción del prototipo (CAD).	80.00	8.00	640.00
Simulación de la manufactura. (CAM).	80.00	8.00	640.00
Total	720.00 hrs.		5760.00 \$

5.5.1.2 Costos del molde.

Tabla 31

Costos del molde.

COSTOS DEL MOLDE			
	cantidad	Costo unitario \$	Costo Total \$
Molde externo	1.00	25.00	25.00
Molde de núcleo	1.00	45.00	45.00
		Total	70.00 \$

5.5.1.3 Costos de mano de obra.

Estos costos están de acuerdo al Ministerio de Relaciones Laborales que establece como salarios mínimos sectoriales 2017, el cual está organizado de acuerdo a sector laboral, ver tabla 32.

Tabla 32

Costos de mano de obra.

COSTOS DE MANO OBRA				
Detalle	Categoría	Salario Real/hora	Horas hombre	Costo Total \$
Técnico mecánico de fundición	D2	2.26	3.00	6.78
Técnico tornero.	D2	2.26	2.00	4.42
Técnico fresador.	D2	2.26	1.00	2.26
Ayudante en general.	C2	2.23	7.00	15.61
Técnico de laboratorio. (ensayo de materiales)	D2	1.58	6.00	9.48
Total 2			19.00 hrs.	38.55 \$.

5.5.1.4 Costos de materiales

Se describen el tipo de material y su cantidad utilizada en el proceso de construcción del prototipo, estos valores se detallan a continuación en la tabla 33.

Tabla 33

Costos de materia prima.

COSTOS DE MATERIA PRIMA				
Detalle	Unidad	Cantidad	Costo unitario \$	Costo Total \$
Aluminio	kg	2.00	2.21	4.42
Cobre	kg	0.50	7.00	3.50

CONTINUA 

Ferrosilicio.	kg	5.00	3.50	17.5
Slag (escoriente)	kg	1.00	4.00	4.00
Cartucho para impresión ABS.	kg	0.15	200	15.00
Aglutinantes.	kg	0.50	10.00	5.00
Total 3				49.42 \$

5.5.1.5 Costos de Equipos y máquinas para ensayos y operaciones.

El valor se estimó por el tiempo de uso en horas para cada equipo o máquina, el cual se muestra en la tabla 34:

Tabla 34

Costos de Equipos y máquinas para ensayos y operaciones.

COSTOS DE EQUIPOS Y MÁQUINAS PARA ENSAYOS Y OPERACIONES.			
Detalle	Horas de equipo	Costo por hora	Costo Total \$
Horno de fundición	4.00	25.00	100.00
Torno Manual	0.50	25.00	12.50
Torno CNC	0.85	50.00	42.50
Fresadora CNC	0.42	50.00	21.00
Impresora 3D.	1.00	6.00	6.00
Espectrómetro.	2.00	50.00	100.00
Durómetro.	2.00	25.00	50.00
Total 4	10.77 hrs.		332.00 \$

5.5.1.6 Total de costos y tiempos en el desarrollo del prototipo.

Se calcula que el proyecto lleva un tiempo aproximado de cinco meses (749.11 horas) en su desarrollo a un costo de 6249.92 dólares los resultados se muestran en la tabla 35.

Tabla 35**Total de costos y tiempos en el desarrollo del prototipo.**

TOTAL DEL DESARROLLO DEL PROTOTIPO		
DETALLE	TIEMPO (horas)	COSTO \$
Costos de investigación.	720.00	5760.00
Costos de molde	0.00	70.00
Costos de mano de obra.	19.00	38.55
Costos de materia prima.	0.00	49.42
Costos de Equipos y máquinas para ensayos y operaciones.	10.77	332.00
TOTAL	749.11 hrs	6249.92 \$

5.5.2 Costo de Producción.

Es el precio específico para la producción del impulsor para lo cual se hace referencia a los valores de desarrollo del prototipo, los cuales son únicamente los costos que intervienen en la manufactura, además se recalca que la vida útil del molde es para diez piezas antes de deteriorarse. Ver tabla 36.

Tabla 36**Costos de producción.**

COSTOS DE PRODUCCIÓN.		
DETALLE	TIEMPO (horas)	COSTO \$
Costos de molde	0.00	7.00
Costos de mano de obra.	13.00	29.07
Costos de materia prima.	0.00	34.42
Costos de Equipos y máquinas para ensayos y operaciones.	4.82	176.00
TOTAL	17.82 hrs	246.49 \$

De acuerdo a la tabla 36 se puede fabricar un prototipo aproximadamente a un costo de 1.5 veces mayor que el importado; sin embargo, cuando se fabrica por lote su costo baja, y el tiempo de producción no se altera, a diferencia del producto extranjero que demoraría 30 días (720 horas) en su llegada. Vea la tabla 37.

Tabla 37

Costos entre producto importado y el prototipo.

COSTOS ENTRE PRODUCTO IMPORTADO Y EL PROTOTIPO.			
Detalle del impulsor	Cantidad	Costo Total \$	TIEMPO (horas)
Prototipo.	1.00	246.49	17.82
Importado	1.00	160.22	720.00

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1 Conclusiones.

- Haciendo uso de la ingeniería inversa: escáner 3D, software CAD e impresora 3D se pudo desarrollar el diseño conceptual del prototipo, lo que permitió de esta manera manufacturar un prototipo de similar geometría al original.
- Se realizó al impulsor real en ensayo de materiales: composición química (99.59 %Fe, 0.023 %C, 0.005 %Mn, 0.01 %P, 0.01 %S), microestructura y la dureza Vicker (92 HV) determinando que es un material de bajo carbono no apto para este tipo pieza, y de acuerdo a este análisis se pudo seleccionar un material con mejores características siendo el aluminio A206.0 T7 ((96.59 % AL 0.72 %Cu, 0.7 % Fe, 0.02 % Mn, 0.04 % Ni, 0.8 % Si, 0.01 % Sn, 0.1 % Ti, 0.14 % Zn); (131.98 HV))
- La simulación del impulsor en el software CAE, por el método de elementos finitos, se pudo analizar el comportamiento del material (Hierro fundido, austenítico (nodular) EN GJSA XNiCr20 2, A206.0 T7 y Acero inoxidable ASTM CA-6NM), sometido a una carga estática tensión nodal (Von-Mises) los resultados de cada material varían en un porcentaje moderado, el factor de seguridad dado por el software del material de hierro fundido (0,91) no es aceptado.
- Al comparar los datos de dimensiones se obtuvo cinco errores de tolerancias la primera del chavetero con una desviación de la base y la altura (+ 0.012,+0,65) mm, la segunda del diámetro del eje con una desviación de +0,028 estas tres desviaciones puede ocasionar problemas de vibración del impulsor, a su vez provocaría un mal funcionamiento de la bomba, la tercera desviación es la altura de la tapa del impulsor 0,4 mm la cual no tendría mucha incidencia en el funcionamiento, la cuarta y última es del diámetro de entrada del fluido de -

0,45mm, esta desviación se debe corregir mecanizando en una máquina (torno) que no tenga problemas de vibración.

- Se determinó que las variables de funcionamiento de la bomba con respecto al caudal y altura (datos de garantía/fabricante) en comparación a los datos de ensayo hidráulico (funcionamiento con el impulsor real o prototipo) variaron un 2 % lo que es aceptable de acuerdo a la norma ISO 9906,
- Al comparar los costos se determinó que manufactura el prototipo del impulsor es 53,85% más costoso que del importado, pero con respecto del tiempo obtención el prototipo es favorable en un 99%.

6.2 Recomendaciones.

- Elaborar una producción mayor en serie, se recomienda hacer uso de materiales más resistentes para el desarrollo del molde tanto del núcleo como para el externo, ya que estos moldes se deterioraran con el tiempo perdiendo su función.
- Ejecutar la calibración y certificación de los equipos de metrología y de laboratorio de materiales para tener una mejor confiabilidad en los datos adquiridos.
- Mejorar la manufactura en cuanto al material de fundición para productos funcionales, lo cual podría ser mejorar el Aluminio (AL 206.0 T7) a un Acero inoxidable el cual tendrá mayor resistencia al desgaste por erosión.
- Se recomienda para simulación CAE del impulsor se deberá trabajar con un software especializado en el área de elementos finitos, para de esta manera crear una malla adecuada (fina) donde los resultados sean precisos.

REFERENCIAS

- Ashby, M. (2005). *Materials Selection in Mechanical Design*. Amsterdam: Pergamon Press.
- Budynas, R., & Nisbett, K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México: McGraw-Hill.
- Cardenas, R., Orozco, D., Pérez, J., & Pineda, E. (2011). *Diseño, Análisis y Simulación de un Prototipo de Péndulo Invertido y su respectivo Sistema de Control para el Laboratorio de Control de la UAN Sede Manizales*. Manizales: GRIN Verlag.
- Escobar, C. (2016). *Tipos de impresoras 3D*. Obtenido de <https://impresoras3d.com/blogs/noticias/102883975-tipos-de-impresoras-3d>
- Fernández, P. (2011). *Bombas Centrifugas y Volumétricas*. Obtenido de <http://www.termica.webhop.info/>
- Formizable. (2016). *Impresión 3d con metal ¿cómo funciona?* Obtenido de <http://formizable.com/impresion-3d-con-metal-como-funciona/>
- González, A. (2003). *Prácticas de ingeniería de fluidos*. Oviedo-España: Universidad de Oviedo.
- Goyos, L. (1994). *Tecnología de la Fundición II*. La Habana: ISPAJAE.
- Gunt Hamburg. (2017). Obtenido de http://www.gunt.de/images/datasheet/1469/WL-204-Presin-de-vapor-del-agua-gunt-1469-pdf_1_es-ES.pdf
- Jarauta, F., Medina, P., Oosterman, A., Cirugeda, S., López, R., Wagensberg, J., . . . Franc'Pairon. (2014). *Cuadernos de Diseño 4: Diseño de procesos*. Madrid: IED Madrid.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México: Pearson Educación.
- Krajewski, L., & Ritzman, L. (2000). *Administración de operaciones: estrategia y análisis*. México: Pearson Educación.
- L.A.E, & Mejía, R. (2000). *Tecnología Aplicada a Los Procesos de Manufactura*. México: UNAM.
- Madsen, D. (2012). *Engineering Drawing & Design*. Nueva York: Delmar.
- Mediatrends. (2015). *Cuáles son los mejores materiales para imprimir en 3D*. Obtenido de <http://www.mediatrends.es/a/40090/mejores-materiales-imprimir-3d/>
- Miranda, O. (2014). *Diseño y manufactura de un impulsor para una bomba centrifuga de 5hp, para aplicaciones de cavitación hidrodinámica*. México: UNAM.
- Parras, D., Romero, L., & Cavas, F. (2016). *Utilización del escaneado 3d e ingeniería inversa para el prototipado de piezas mecánicas*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Sanchez, G. (2014). *Uso de la Tecnología en el Aula II*. EE.UU: Palibrio.
- Sierra, S. (2010). *Modelación geométrica del impulsor de una bomba centrifuga*. Medellín: Universidad EAFIT.
- Uanl. (2012). *Erosión*. Obtenido de http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020150052/1020150052_04.pdf

Universia. (2015). *¿Qué es un prototipo y para qué sirve?* Obtenido de <http://noticias.universia.es/consejos-profesionales/noticia/2015/09/29/1131645/prototipo-sirve.html>

Wilo. (2005). *Principios fundamentales de la tecnología de las bombas centrífugas*. Obtenido de http://www.wilo.es/fileadmin/es/Downloads/pdf_entero.pdf