

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO DE IMPULSORES DE UNA BOMBA HIDRÁULICA DE AGUA PARA QUE FUNCIONE COMO TURBINA

**“ESTUDIAR LOS MATERIALES DE IMPULSORES PARA QUE UNA BOMBA
HIDRÁULICA FUNCIONE COMO TURBINA”**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

EDWIN FERNANDO CHILIG CADENA

edwin.chilig@epn.edu.ec

DIRECTOR: VICTOR HUGO HIDALGO DIAZ

victor.hidalgo@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2023

CERTIFICACIONES

Yo, EDWIN FERNANDO CHILIG CADENA declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



Edwin Fernando Chilig Cadena

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por EDWIN FERNANDO CHILIG CADENA, bajo mi supervisión.



Ing. Víctor Hugo Hidalgo Díaz, D.Sc.
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el producto resultante del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Edwin Fernando Chilig Cadena

Ing. Víctor Hugo Hidalgo Díaz, D.Sc.

DEDICATORIA

El presente trabajo investigativo lo dedico principalmente a mis padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. Es un orgullo y un privilegio ser su hijo, son los mejores padres.

A mis hermanas por estar siempre presentes, acompañándome y por el apoyo moral que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida.

A mis compañeros, porque sin el equipo que formamos, no habiéramos logrado esta meta.

A todas las personas que nos han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

AGRADECIMIENTO

Me van a faltar páginas para agradecer a las personas que se han involucrado en la realización de este trabajo, sin embargo, merecen reconocimiento especial mi Madre y mi Padre que con su esfuerzo y dedicación me ayudaron a culminar mi carrera universitaria y me dieron el apoyo suficiente para no decaer cuando todo parecía complicado e imposible.

Asimismo, agradezco infinitamente a mis Hermanas que con sus palabras me hacían sentir orgulloso de lo que soy, a mi gran amor Eliana, a mi hija Alana por ser la fuerza necesaria en este camino.

De igual forma, agradezco a mi director de Tesis, que gracias a sus consejos y correcciones hoy puedo culminar este trabajo. A los Profesores que me han visto crecer como persona, y gracias a sus conocimientos hoy puedo sentirme dichoso y contento.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
Objetivo general	2
Objetivos específicos	2
Alcance	2
1 Marco teórico.....	3
1.1 Antecedentes.....	3
1.2 Bombas hidráulicas	3
1.2.1 Bombas centrífugas.....	4
1.3 Bombas hidráulicas funcionando como turbinas	5
1.3.1 Rodete de una bomba turbina	6
1.4 Técnicas de optimización de un rodete.....	7
1.5 Software de Dibujo 3D.....	8
1.5.1 Autodesk Inventor.....	8
1.5.2 FreeCAD	9
2 METODOLOGÍA.....	10
2.1 Generalidades	10
2.2 Desarrollo el modelo 3D	11
2.3 Selección de materiales.....	12
2.3.1 Criterio de selección de materiales	12
2.4 Optimización del modelo 3D.....	12
2.4.1 Selección de reducción porcentual	13
2.4.2 Reducción del diámetro del rodete	13
2.5 Obtención del modelo 3D	14
2.6 Cálculo de eficiencia de la bomba turbina.....	15
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	17

3.1	Resultados	17
3.1.1	Modelo 3D	17
3.1.2	Selección de materiales.....	19
3.1.3	Eficiencia de la bomba turbina.....	20
3.1.4	Planos	21
3.2	Conclusiones	23
3.3	Recomendaciones.....	24
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	25
5	ANEXOS.....	26

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Clasificación de las bombas hidráulicas.....	4
Figura 1.2. Dirección de funcionamiento de una bomba y una turbina.....	5
Figura 1.3. Tipos de rodetes. a) Abierto b) Semiabierto c) Cerrado.....	7
Figura 1.4. Interfaz de Autodesk Inventor.....	8
Figura 1.5. Interfaz de FreeCAD.....	9
Figura 2.1. Estructura metodológica del caso de estudio.....	10
Figura 2.2. Modelo 3D del rodete original.....	11
Figura 2.3. Modelo 3D de los rodetes con la reducción de diámetros.....	15
Figura 3.1. Modelo 3D con diámetro reducido en 5%.....	17
Figura 3.2. Modelo 3D con diámetro reducido en 10%.....	18
Figura 3.3. Modelo 3D con diámetro reducido en 15%.....	18
Figura 3.4. Modelo 3D con diámetro reducido en 20%.....	19
Figura 3.5. Eficiencia vs Caudal para distintos diámetros del rodete.....	21

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Características principales de una bomba turbina.....	5
Tabla 1.2. Principales características de los rodetes.....	6
Tabla 2.1. Relación de selección de materiales.....	12
Tabla 2.2. Datos de reducción de diámetros externos.....	14
Tabla 3.1. Relación de selección total de materiales.....	19
Tabla 3.2. Datos obtenidos de la eficiencia para diferentes diámetros del rodete.....	20

RESUMEN

El presente trabajo se enfocó en desarrollar una optimización mediante el empleo de la técnica de reducción porcentual de diámetro externo. Este proceso se realizó mediante la modificación de modelo 3D proporcionado por estudios anteriores con la finalidad de incrementar la eficiencia obtenida para diversos caudales. También se realizó un análisis de selección de materiales para determinar las ventajas que posee el rodete actual. Luego se empleó 4 reducciones porcentuales diferentes en múltiplos de 5, siendo así el 20% el valor máximo a analizar. Luego de esto se procede a obtener los nuevos modelos 3D y realizar la validación de estos mediante el uso de un criterio de aceptación del incremento o disminución de la eficiencia. Con la finalidad de realizar esta validación se realiza el cálculo de eficiencia para cada uno de los nuevos diámetros obtenidos, dicho cálculo se realiza con una relación de los diámetros empleando el diagrama de Moody. Finalmente se realizó el informe de resultados obtenidos y el dibujo de los planos correspondientes a cada rodete, teniendo en cuenta los parámetros obligatorios del código de dibujo mecánico.

PALABRAS CLAVE: eficiencia, modelo 3D, Moody, reducción.

ABSTRACT

The present work focused on developing an optimization using the technique of percentage reduction of external diameter. This process was carried out by modifying the 3D model provided by previous studies to increase the efficiency obtained for different flow rates. A material selection analysis was also carried out to determine the advantages of the current impeller. Then, four different percentage reductions in multiples of 5 were used, being 20% the maximum value to be analyzed. After this, we proceeded to obtain the new 3D models and to validate them by using a criterion of acceptance of the increase or decrease in efficiency. To perform this validation, the efficiency calculation was made for each of the new diameters obtained, this calculation is made with a relation of the diameters using the Moody diagram. Finally, a report of the results obtained and the drawing of the corresponding plans for each impeller were draw, considering the mandatory parameters of the mechanical drawing code.

KEYWORDS: efficiency, 3D model, Moody, reduction.

DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

En el año 2022 la Escuela Politécnica Nacional realizó la adquisición de una bomba centrífuga, con la finalidad de realizar un estudio de su desempeño como bomba turbina para desempeñarse como alternativa efectiva de producción energética para micro centrales hidroeléctricas que se encuentran en lugares de difícil acceso y con ríos que poseen caudales muy bajos y pocos niveles de sedimentación [1].

A lo largo de este proyecto se muestra el proceso de optimización mediante reducción del diámetro externo del rodete de una bomba turbina. Se realizará un análisis previo de selección de materiales empleando un criterio de ponderación para asegurar que el material original del rodete a optimizar sea el adecuado. Luego de esto se procede a emplear *FreeCAD*, que es un software de código abierto de diseño 3D, el cual permite la realización de un boceto 2D parametrizado. Esto sirve para definir los porcentajes de reducción del diámetro y proceder con la extrusión en operación de corte y así obtener los modelos 3D.

Luego se realiza el cálculo de la eficiencia mediante el uso de una ecuación que emplea una relación del diagrama de Moody [2]. Esta relación se basa en la interacción del diámetro nominal y el diámetro propuesto, con la eficiencia nominal que posee la bomba turbina. Con esto se emplea el criterio de aceptación, el mismo que se enfoca en determinar el impacto que posee las modificaciones del rodete, para así proceder con la redacción del informe de resultados. Finalmente se procede a emplear el código de dibujo mecánico para la realización de los planos y así dar por finalizado este estudio.

Objetivo general

Estudiar los impulsores de una bomba hidráulica de agua para que funcione como turbina

Objetivos específicos

1. Revisar el estado del arte acerca de las técnicas de optimización de un rodete
2. Analizar la influencia de los materiales de un rodete
3. Desarrollar una metodología adecuada para la optimización de un rodete
4. Obtener el modelo geométrico y planos del rodete optimizado

Alcance

Este proyecto tiene como finalidad la obtención del modelo CAD optimizado de un rodete de la bomba adquirida por el laboratorio de mecánica informática, mediante el uso de software libre de modelación 3D *FreeCAD*. Además, se tiene como objetivo el análisis de los materiales y la obtención de los planos del rodete optimizado según la técnica de reducción de diámetro externo.

1 MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes

En el año 2014, un estudio realizado por Sanjay V. Jain, titulado "*Effects of impeller diameter and rotational speed on performance of pump running in turbine mode*", analizó las variaciones del diámetro del rodete de una bomba. Esto se realizó mediante la reducción porcentual del diámetro externo del rodete, también se empleó un redondeo de los álabes, lo cual permitió analizar la influencia de esta geometría en el incremento o disminución de la eficiencia. Finalmente analizaron el impacto que posee la velocidad de rotación en el comportamiento de la bomba junto con las variaciones realizadas [3].

En el año 2022, en la Escuela Politécnica Nacional, se desarrolló el estudio de la "parametrización de una bomba funcionando como turbina". Este trabajo tuvo como finalidad analizar la eficiencia que esta posee, mediante un estudio numérico empleando el software OpenFOAM, para lo cual recrearon el modelo físico con técnicas de escaneo 3D y diseño en *FreeCAD*. Además, se desarrolló el modelo matemático que les permitió comparar los resultados y validar el estudio realizado [1].

1.2 Bombas hidráulicas

Es una máquina generadora encargada de transformar la energía mecánica en energía hidráulica, la que permite el movimiento de fluidos incompresibles de un punto a otro. Esto es posible debido al incremento de presión y velocidad del fluido gracias a la interacción existente entre este y el rodete de la bomba. Además, debido a las ventajas que poseen estas máquinas existe una amplia variedad de ellas. La figura 1.1. presenta la principal clasificación de bombas que existen.

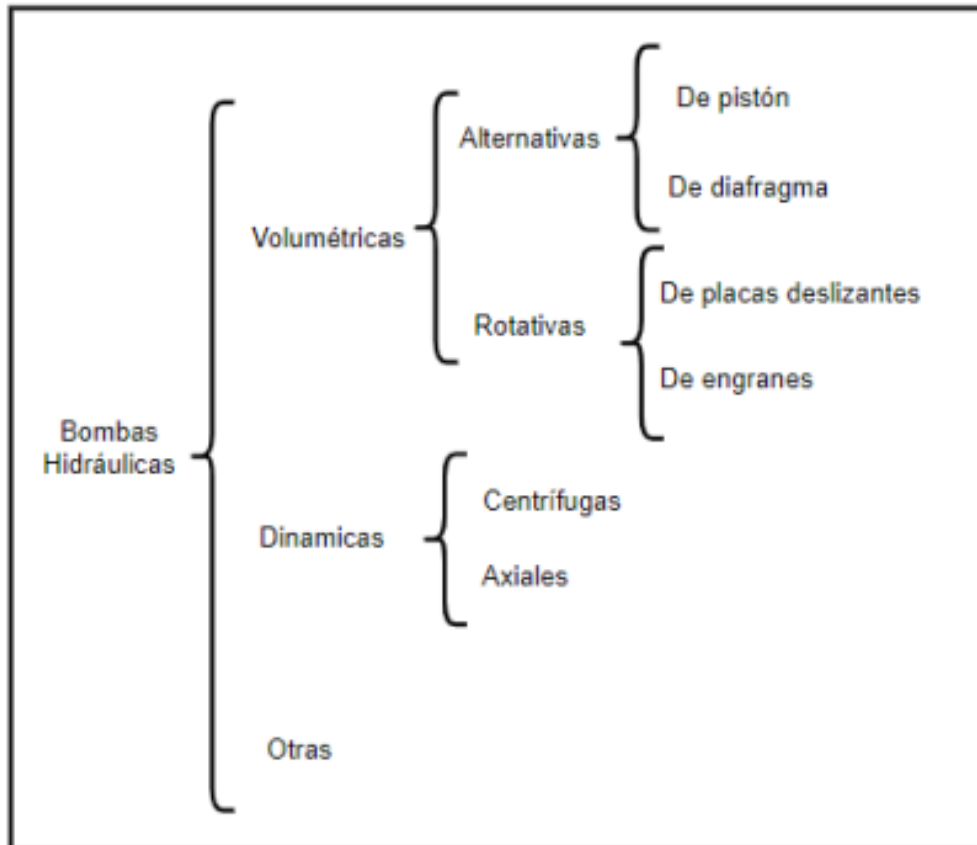


Figura 1.1. Clasificación de las bombas hidráulicas
(Fuente: [4])

Como se muestra en la figura 1.1, las bombas se clasifican principalmente en volumétricas y dinámicas, esto se debe a la principal característica que posee cada una de ellas para su funcionamiento. Las bombas volumétricas se caracterizan por impulsar el fluido a velocidad constante, de forma independiente de la presión de descarga existente, manteniendo un volumen prácticamente constante durante su funcionamiento [4]. Por otra parte, las bombas dinámicas se encargan de intercambiar movimiento entre la máquina y el fluido, empleando el principio de la hidrodinámica, para así desplazar el fluido de un punto a otro [5].

1.2.1 Bombas centrífugas

Esta máquina hidráulica pertenece a las bombas dinámicas, por lo que transforma la energía cinética entregada por un rodete a energía potencial, para generar un incremento de presión en el fluido transportado. Además, este tipo de bombas trabaja a una velocidad de rotación constante y con un volumen definido por la geometría y capacidad que posea esta bomba. Este tipo de bombas posee un amplio uso en varias industrias, en

base a la versatilidad de aplicaciones que poseen y la compatibilidad que tienen para trabajar en distintos sistemas.

1.3 Bombas hidráulicas funcionando como turbinas

Son máquinas hidráulicas denominadas bombas turbinas, que se caracterizan por su particular desempeño, mismo que consiste en trabajar en sentido inverso del habitual. Esto permite crear nuevas alternativas para implementarlas en pequeñas centrales hidroeléctricas, las cuales servirán para suministrar pequeñas cantidades de energía eléctrica para el funcionamiento de dispositivos de poco consumo [6]. Además, estas máquinas poseen una gran variedad de repuestos lo cuales poseen bajos costos. La figura 1.2. presenta las direcciones de funcionamiento de una bomba estándar y una bomba turbina.

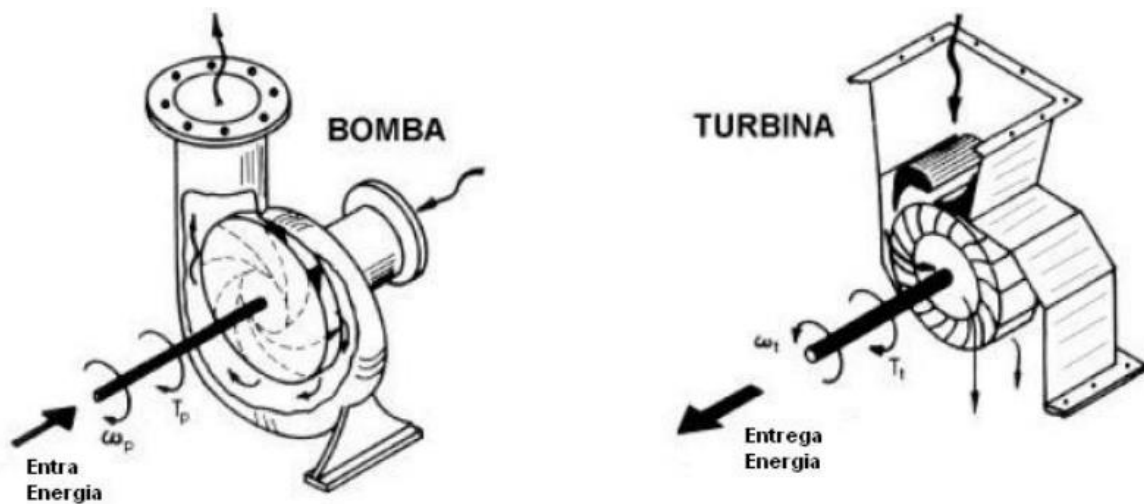


Figura 1.2. Dirección de funcionamiento de una bomba y una turbina
(Fuente: [6])

La tabla 1.1. presenta las principales características que posee una bomba turbina respecto a diversos parámetros

Tabla 1.1. Características principales de una bomba turbina

Parámetros	Características
Costos	Bajos costos de fabricación, operación y mantenimiento.
Mantenimiento	Sencillo de realizar debido a la poca complejidad de los elementos para ser reemplazados.

Fabricación	Bajos tiempos de producción y fabricación.
Rango de operación	Amplios rangos de caudales y presiones.

(Fuente: [6])

1.3.1 Rodete de una bomba turbina

El rodete es el elemento más crítico que se presenta en una bomba turbina, debido a que se realiza una inversión en su sentido de rotación. Esto se hace para cambiar su comportamiento y funcionamiento de una bomba hidráulica convencional a una turbina hidráulica [4]. Además, en base a estudios existentes sobre estos elementos, se ha demostrado que poseen un alto factor de influencia en los valores de eficiencia obtenidos en las bombas turbinas durante su funcionamiento.

Debido a la importancia que poseen estos elementos, se clasifican en 3 tipos, los cuales son: abierto, semiabierto y cerrado. En la tabla 1.2. se indican las principales características que poseen estos rodetes.

Tabla 1.2. Principales características de los rodetes

Tipo	Características
Abierto	Permite la circulación de fluidos abrasivos Ambos lados de las paletas se encuentran libres Posee baja resistencia estructural
Semiabierto	Permite la circulación de fluidos con pequeñas partículas Un solo lado de las paletas se encuentra libre Posee mayor resistencia estructural Genera mayor eficiencia que un rodete abierto
Cerrado	Permite la circulación de fluidos limpios Ambos lados de las paletas se encuentran cubiertos Poseen un alto nivel de resistencia estructural Tienen mayor eficiencia que los rodetes semiabiertos

(Fuente: [7])

Además, la figura 1.3. muestra de forma clara y concisa el diseño que posee cada tipo de rodete mencionado, sobre todo la principal forma de diseño que posee cada uno de ellos.

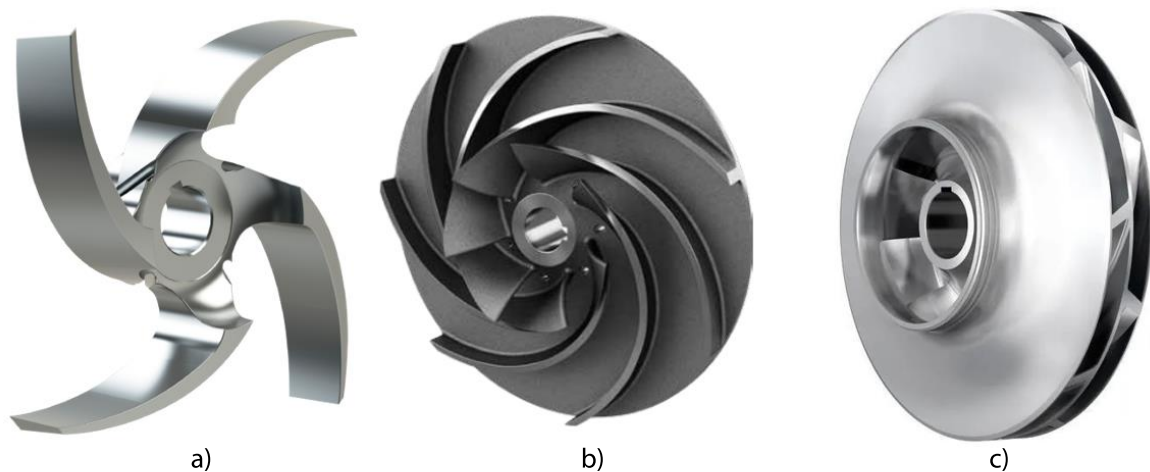


Figura 1.3. Tipos de rodetes. a) Abierto b) Semiabierto c) Cerrado
(Fuente: [6])

1.4 Técnicas de optimización de un rodetete

En base a la importancia que poseen los rodetes en el desempeño y la eficiencia de una bomba turbina, se han realizado varios estudios que permitieron determinar distintas técnicas de optimización de estos. Dentro de las principales técnicas destaca la optimización por reducción de diámetro externo o recorte del rodetete, y la técnica de redondeo de los álabes.

La optimización por reducción de diámetro es una de las técnicas más empleadas por pequeñas empresas que brindan soluciones a problemas de eficiencia de bombas turbinas. Esto se realiza debido a que posee un bajo costo y genera un mínimo impacto estructural al diseño original del rodetete [3]. Además, representa una rápida opción de optimización sin necesidad de rediseñar de forma compleja los parámetros predominantes del rodetete.

Por otro lado, la optimización por redondeo de álabes es un método eficiente que asegura un incremento en la eficiencia de una bomba turbina. Sin embargo, este proceso requiere de una inversión superior debido a las operaciones complejas a realizar para redondear los álabes, sin modificar ninguna otra parte de rodetete. También, se debe recalcar que se necesita un alto conocimiento de los parámetros de diseño del rodetete para que la curvatura de redondeo sea óptima y produzca el mayor impacto en el incremento de la eficiencia, y no genere conflictos con el funcionamiento y desempeño del equipo [8].

1.5 Software de Dibujo 3D

En la actualidad el uso de software de dibujo 3D ha incrementado exponencialmente debido a la gran cantidad de ventajas que posee para el diseño, rediseño, optimización y análisis de desempeño de distintos elementos, máquinas, entre otros. Esto se realiza con la finalidad de reducir los costos de producción y disminuir la cantidad de piezas fabricadas incorrectamente. Además, permite parametrizar los diseños de elementos y máquinas para ajustarlos según la necesidad de los usuarios y del mercado. Dentro de los principales softwares de dibujo 3D se encuentran Autodesk Inventor y *FreeCAD*.

1.5.1 Autodesk Inventor

Es uno de los softwares de modelado de sólidos 3D más representativo del mercado, mismo que emplea diversas operaciones geométricas y herramientas con la finalidad de convertir bocetos 2D en sólidos 3D. Al ser un software comercial posee una interfaz gráfica muy desarrollada, la cual es amigable con el usuario y facilita la creación de los elementos. De igual forma posee varios módulos especializados en ensamblaje de piezas para la creación de elementos grandes, o máquinas completas [9]. Además, facilita la creación de diversas animaciones del funcionamiento que poseen los elementos creados, y así asegurar que su diseño es el adecuado. La figura 1.4. presenta interfaz de usuario de Inventor.

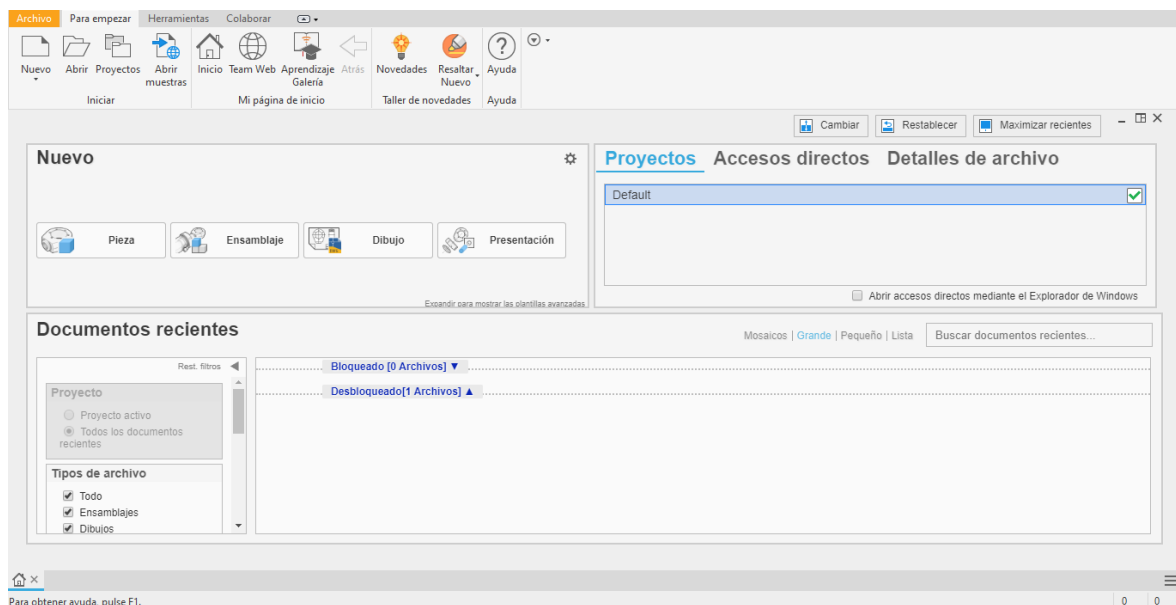


Figura 1.4. Interfaz de Autodesk Inventor
(Fuente: propia)

1.5.2 FreeCAD

Es un software de dibujo 3D de código libre, el cual es empleado en diversas áreas de la industria mecánica, petrolera, aeronáutica, entre otras. Este software posee una instalación sencilla, además es compatible con todos los sistemas operativos existentes.

Posee una interfaz menos amigable que un software comercial, sin embargo, se encuentra muy bien distribuida. Posee un menú tipo lista que permite cambiar entre los diversos módulos que posee, al realizar uno de estos cambios se modifican las operaciones disponibles a realizar. Además, posee una gran afinidad para trabajar con modificaciones de nodos en geometrías complejas, esto permite realizar operaciones específicas que afectan únicamente a las superficies deseadas y no a la geometría global a pesar de emplear modelos paramétricos [10]. La figura 1.5. presenta la interfaz que posee FreeCAD.

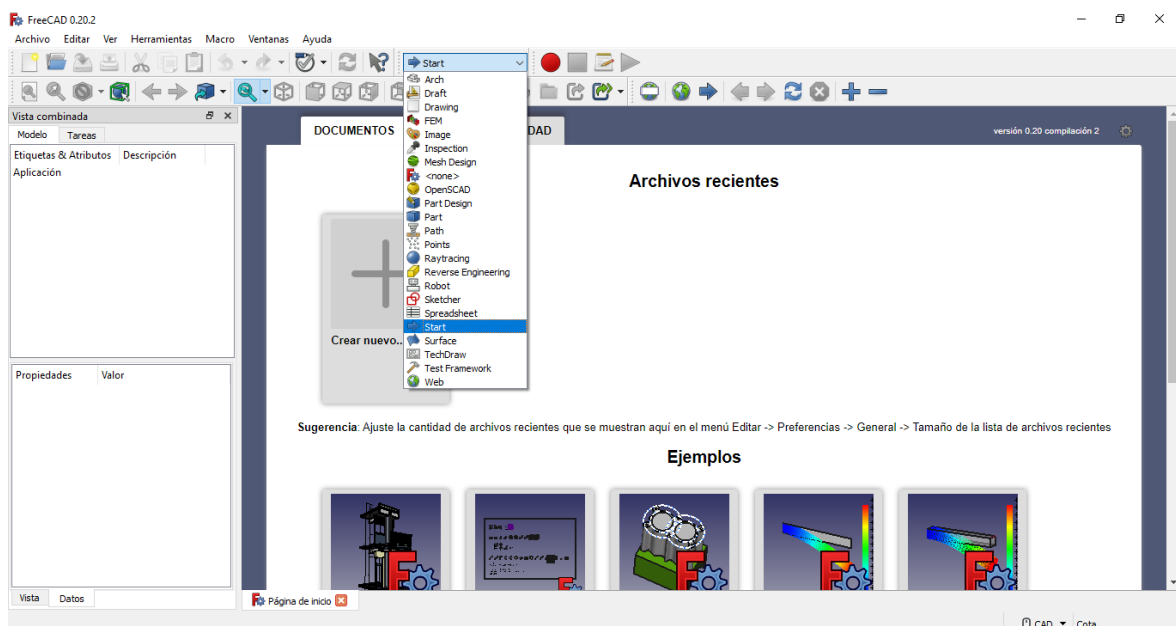


Figura 1.5. Interfaz de FreeCAD
(Fuente: propia)

2 METODOLOGÍA

En el presente capítulo se muestra la metodología utilizada para el desarrollo del estudio. Este estudio tiene como propósito mostrar la optimización por reducción de diámetro de un rodete, la obtención del modelo 3D y los planos correspondientes empleando un software de código libre. Siendo *FreeCAD* el software seleccionado debido a la factibilidad que posee para modificación de elementos 3D mediante su parametrización.

2.1 Generalidades

La figura 2.1. muestra la conceptualización que posee la metodología, misma que se empleará para el desarrollo del presente estudio. Esto se inicia con un análisis del diseño actual que posee el rodete a partir de la nube de puntos proporcionada por estudios anteriores, luego se realizará un análisis de selección de materiales, mismo que servirá como premisa para realizar la selección del criterio de reducción porcentual del diámetro externo. Después se realizará la disminución del diámetro externo y el corte de longitud de los álabes, con la finalidad de satisfacer los requerimientos del caso de estudio.

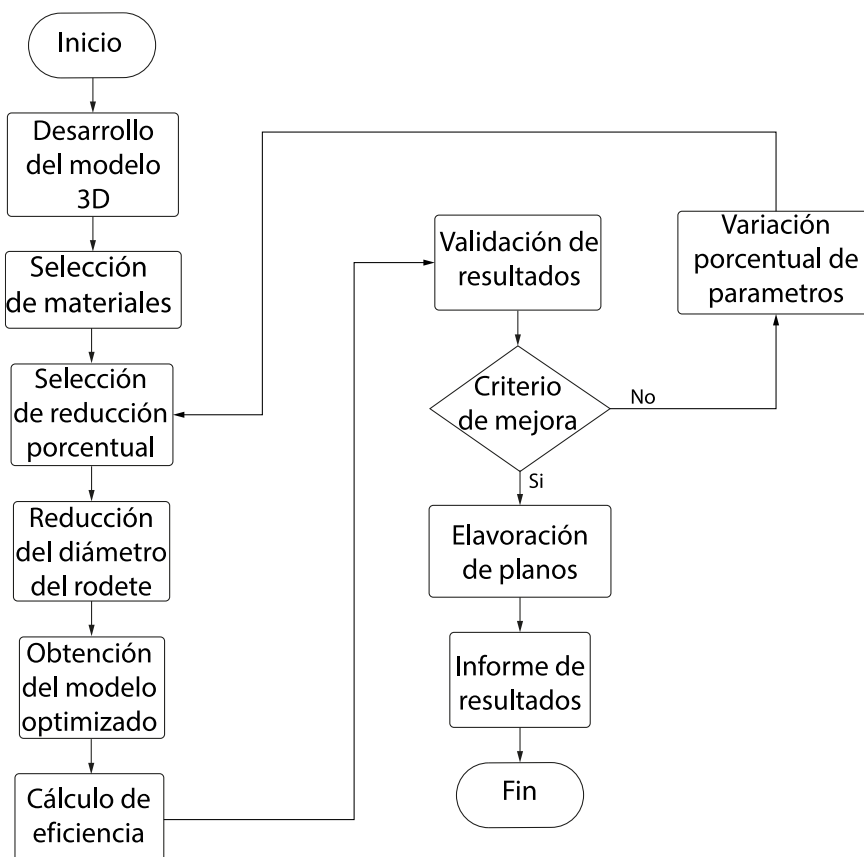


Figura 2.1. Estructura metodológica del caso de estudio
(Fuente: propia)

Luego de esto se procede a obtener los modelos 3D de los nuevos rodetes, los cuales se emplearán para extraer los archivos *stl* que servirán para futuros análisis. Además, se empleará un modelo matemático que permitirá determinar la aceptación de la optimización del comportamiento del rodete. En caso de que este criterio no se cumpla a cabalidad, se regresa nuevamente a la selección de reducción porcentual, para así escoger nuevos valores que serán evaluados de la misma forma. Caso contrario, si el cumplimiento de este criterio es exitoso se procede a elaborar los planos de estos diseños, en los cuales se especifican todas las medidas del rodete, sus tolerancias geométricas y acabados superficiales. Finalmente se redacta el informe de resultados, para así concluir con los objetivos de presente caso.

2.2 Desarrollo el modelo 3D

Para el desarrollo del presente estudio se empleará el modelo 3D del rodete de una bomba centrífuga de 1800 rpm, el cual fue empleado en la parametrización de una bomba turbina por parte de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional [1]. Esta geometría permitirá la optimización del rodete, con la finalidad de incrementar la eficiencia que posee al funcionar como turbina, y así permitir su aplicación en micro centrales hidroeléctricas o en zonas agrícolas. La figura 2.2. presenta el modelo 3D a ser optimizado.

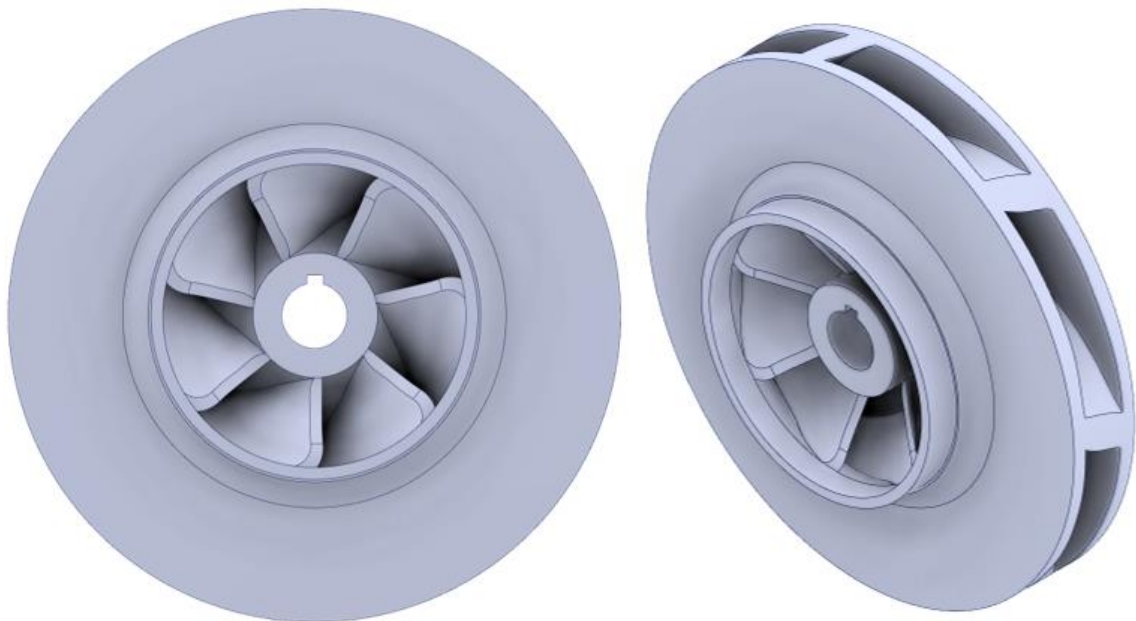


Figura 2.2. Modelo 3D del rodete original
(Fuente: propia)

2.3 Selección de materiales

Con el objetivo de determinar un material adecuado que permita el procedimiento de reducción porcentual del diámetro del rodete, para lo cual se debe considerar el costo de reducción, modificaciones de propiedades mecánicas y costo de producción del rodete. Se empleará un criterio de selección adecuado que evalúe los parámetros mencionados y permita asegurar el correcto desempeño del rodete y minimice el impacto generado por la reducción de diámetro planteada. Además, se enfocará este análisis como premisa debido a la poca influencia que posee la selección de materiales en una optimización, como es en este caso de estudio.

2.3.1 Criterio de selección de materiales

Para realizar una selección adecuada del material del rodete de una bomba turbina, se debe emplear un criterio de ponderación para al menos tres parámetros influyentes en la toma de decisiones [11]. En este caso se empleará los parámetros de fabricación, costos del material y cambios de las propiedades durante su fabricación, además, se utilizará un rango de evaluación del 1 al 5, en el que 1 será el valor mínimo y 5 el máximo para cada parámetro a evaluar. En la tabla 2.1. se presenta los rangos de evaluación para cada parámetro.

Tabla 2.1. Relación de selección de materiales

Materiales	Fabricación	Costos	Cambios de Propiedades
Fundición Gris	2	2	3
Aluminio	2	3	4
Acero	3	4	3
Aleación de Titanio	4	5	2

(Fuente: propia)

2.4 Optimización del modelo 3D

Con la finalidad de incrementar la eficiencia del rodete, se plantea la optimización de modelo 3D original, el cual fue extraído mediante un proceso de ingeniería inversa denominado escaneo 3D. Este proceso será realizado mediante el uso de *FreeCAD*, debido a las facilidades que presenta para la modificación de modelos paramétricos y así determinar el diseño más eficiente para su aplicación.

2.4.1 Selección de reducción porcentual

Para realizar la optimización del rodete actual, se procede a seleccionar el método de reducción porcentual, debido a que es el proceso menos complejo en el cual no se modifican varios parámetros de diseño del rodete. Este método se enfoca en la disminución proporcional del diámetro externo del rodete para generar un incremento de la eficiencia de la máquina hidráulica.

Esta técnica se enfoca en disminuir porcentualmente el diámetro externo en un rango del 5 al 20%, con la finalidad de influenciar levemente en la eficiencia obtenida de una bomba turbina. En base a estudios realizados previamente, se evidencia que estas variaciones pueden afectar de forma positiva o negativa en cuanto a la eficiencia de la bomba turbina, lo que produce un incremento o una disminución de esta según el porcentaje de reducción del diámetro externo [3].

2.4.2 Reducción del diámetro del rodete

La reducción de diámetro se realiza mediante una resta entre el diámetro nominal del rodete, y el porcentaje de reducción de este. Se realizará un total de 4 reducciones siendo del 5, 10, 15 y 20% del diámetro nominal, con la finalidad de analizar la influencia que este genera en la eficiencia de la bomba turbina. Se presenta los cálculos realizados para la reducción de diámetro [2].

$$Dr = D - D * \%r$$

Donde

Dr: Diámetro reducido del rodete

D: Diámetro externo del rodete

%r: Valor de reducción en porcentaje

$$Dr = 206 - 206 * 5\%$$

$$Dr = 206 - 10,3$$

$$Dr = 195,7 \text{ [mm]}$$

En la tabla 2.1. se presenta de forma resumida las reducciones realizadas para cada uno de los porcentajes considerados para el modelo de estudio seleccionado.

Tabla 2.2. Datos de reducción de diámetros externos

Diámetro externo nominal [mm]	% Reducción	Diámetro reducido [mm]
206	5%	195,7
	10%	185,4
	15%	175,1
	20%	164,8

(Fuente: propia)

Estos valores son la referencia principal para realizar la reducción de diámetro externo del rodete. Se debe tomar en cuenta que se realiza un corte completo desde la tapa superior a la inferior, reduciendo de esta forma la longitud de los álabes, pero sin modificar ninguno de sus ángulos o parámetros de diseño críticos.

2.5 Obtención del modelo 3D

Con la finalidad de obtener el modelo 3D se empleó operaciones básicas del software *FreeCAD*, para lo cual se importará el modelo original proporcionado por el laboratorio de mecánica informática. Una vez se realice esto, se procede a trabajar sobre dicho modelo para así disminuir su diámetro externo. Se emplean operaciones básicas, siendo estas un dibujo en un boceto 2D mismo que permitirá graficar el nuevo diámetro externo que poseerá el rodete. Luego de ello se realizará una extrusión con característica de corte, la cual debe ser pasante de lado a lado para permitir un corte limpio de toda la geometría del rodete. La figura 2.3. presenta los modelos 3D obtenido para cada una de las reducciones realizadas.

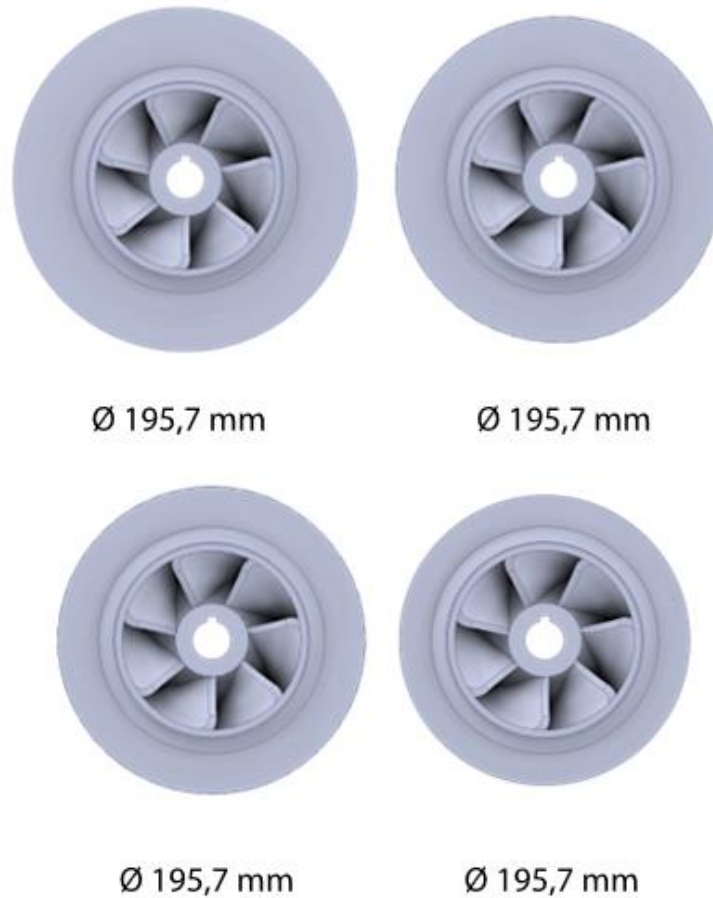


Figura 2.3. Modelo 3D de los rodetes con la reducción de diámetros
(Fuente: propia)

2.6 Cálculo de eficiencia de la bomba turbina

El cálculo de la eficiencia de una bomba turbina es determinado mediante el empleo del diagrama de Moody para determinar una relación matemática entre los diámetros. Esta relación permite estimar la eficiencia del nuevo rodete, una vez se realice una reducción o incremento de su diámetro externo. Generalmente se emplea una reducción de diámetro debido a que representa bajos costos en su manufactura. Se presenta la ecuación que se empleará para determinar los cambios en la eficiencia de la bomba turbina.

$$\eta_T = 1 - (1 - \eta_M)^4 \sqrt{\frac{D_M}{D_1}}$$

Donde

η_T : Eficiencia del nuevo rodete

η_M : Eficiencia del rodete original

D_M : Diámetro externo del rodete original

D_1 : Diámetro externo del nuevo rodete

$$\eta_T = 1 - (1 - 0,329) \sqrt[4]{\frac{206}{175,1}}$$

$$\eta_T = 1 - (0,671) \sqrt[4]{1,176}$$

$$\eta_T = 0,301$$

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

3.1.1 Modelo 3D

Luego de realizar las operaciones mencionadas en la sección 2.4. y realizar un post proceso de imágenes, se muestra de forma detallada cuales son las reducciones del diámetro que ha sufrido para cada uno de los porcentajes establecidos en la metodología. La figura 3.1. muestra que la disminución del diámetro es mínima y se encuentra representada de color rojo, mientras que el sólido resultante se encuentra de color celeste.

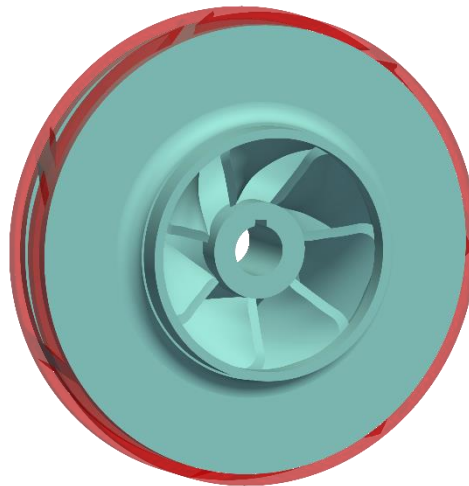


Figura 3.1. Modelo 3D con diámetro reducido en 5%
(Fuente: propia)

Por otra parte, en la figura 3.2. se puede notar el incremento proporcional que existe en la reducción del diámetro externo. También se aprecia los cortes realizados a los álabes y la influencia mínima que posee hasta este punto.

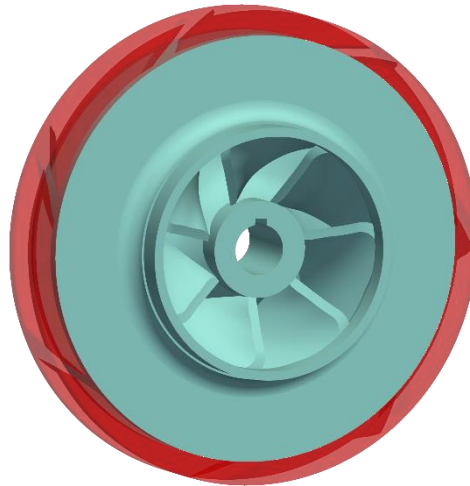


Figura 3.2. Modelo 3D con diámetro reducido en 10%
(Fuente: propia)

En la figura 3.3. se muestra la disminución del 15% realizada en el diámetro externo del rodete. En esta se presenta considerablemente la reducción de los álabes, y se evidencia una gran reducción del diseño estructural nominal del rodete.

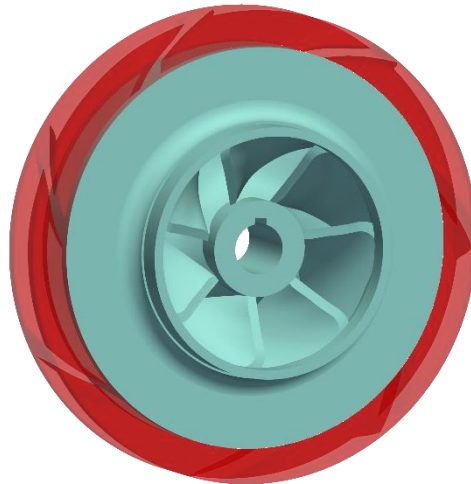


Figura 3.3. Modelo 3D con diámetro reducido en 15%
(Fuente: propia)

Finalmente, en la figura 3.4. se puede visualizar que una disminución del 20% es sumamente perjudicial para el rodete, debido a la reducción excesiva de material. Además, se aprecia notablemente que el nuevo diámetro externo es demasiado corto por lo que la distancia entre la parte interna de la voluta y el rodete es demasiado amplia. Esto a su vez representará una disminución en la presión generada en el interior durante su funcionamiento, y se refleja en una reducción de la eficiencia que existirá.

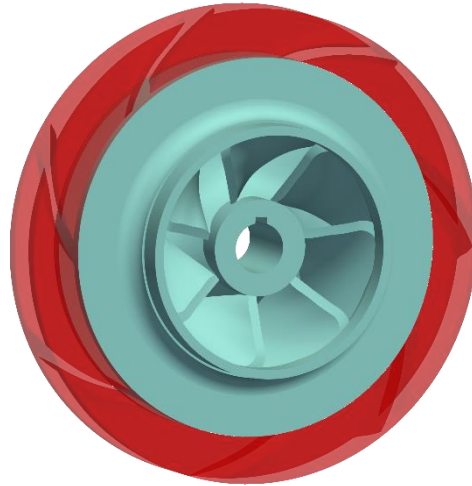


Figura 3.4. Modelo 3D con diámetro reducido en 20%
(Fuente: propia)

3.1.2 Selección de materiales

En base al criterio de selección e indicación de factores de relación de los materiales propuestos, se calculó la relación total. Esta sirvió para determinar un parámetro de selección para el material adecuado, en base a las limitaciones del presente estudio.

Tabla 3.1. Relación de selección total de materiales

Materiales	Fabricación	Costos	Cambios de Propiedades	Relación Total
Fundición Gris	2	2	3	2,33
Aluminio	2	3	4	3,00
Acero	3	4	3	3,33
Aleación de Titanio	4	5	2	3,67

(Fuente: propia)

Como se evidencia en la tabla 3.1. la fundición gris es el material que posee una menor relación total por lo que es el material seleccionado para el presente estudio. A pesar de que el aluminio y acero poseen una relación cercana y prometedora, estos se deben descartar debido a la variación de cambio de propiedades que existe. Finalmente, la aleación de titanio no es considerada por el excesivo costo que posee y su complejidad en la fabricación debido a las herramientas necesarias para los procesos de maquinados requeridos.

3.1.3 Eficiencia de la bomba turbina

En base a la fórmula descrita en la sección 2.5 se realizó todos los cálculos pertinentes para los distintos diámetros a los cuales se redujo el rodete. Además, se empleó todos los datos de caudales y eficiencias proporcionados por el estudio realizado con los datos nominales de operación. Esto permitió realizar un contraste entre los datos del estudio actual y el estudio previo. En la tabla 3.1. se presentan todos los resultados obtenidos para el presente caso de estudio.

Tabla 3.2. Datos obtenidos de la eficiencia para diferentes diámetros del rodete

Diámetro [mm]	206	195,7	185,4	175,1	164,8
Caudal [m³/s]	Eficiencia [%]	Eficiencia [%]	Eficiencia [%]	Eficiencia [%]	Eficiencia [%]
0,01225	32,919	33,773	34,662	30,137	29,070
0,014	38,168	38,956	39,775	35,604	34,620
0,01575	43,463	44,184	44,933	41,119	40,220
0,0175	47,903	48,567	49,258	45,743	44,914
0,01925	51,281	51,902	52,548	49,261	48,486
0,021	53,797	54,386	54,998	51,881	51,146
0,02275	54,914	55,488	56,086	53,044	52,327
0,0245	56,420	56,975	57,553	54,613	53,919
0,02625	58,184	58,717	59,272	56,451	55,785

(Fuente: propia)

La figura 3.5. presenta las variaciones existentes en la eficiencia para cada uno de los caudales y los diferentes diámetros externos obtenidos luego de la reducción de estos. Es notable que existe un incremento de la eficiencia para la reducción del 5%, mientras que para la reducción del 10% existe un incremento superior. También se debe considerar que poseen la misma tendencia de eficiencia, y que su incremento no es muy significativo a pesar ser analizado para diferentes caudales.

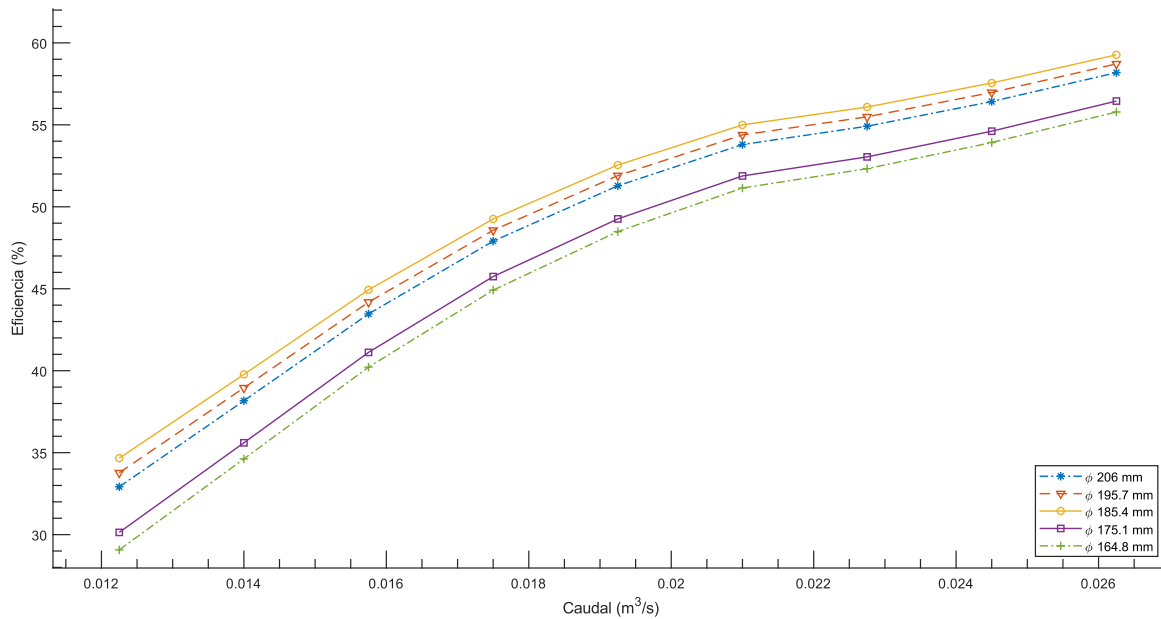


Figura 3.5. Eficiencia vs Caudal para distintos diámetros del rodete
(Fuente: propia)

Por otra parte, se evidencia claramente que al reducir el diámetro externo en un 15% o más únicamente se presenta una disminución en la eficiencia de la bomba turbina. Además, se evidencia la existencia de una separación superior en cuanto a la curva nominal con la del 171,1 mm, por lo que se puede asumir que al realizar una reducción superior al 10% la eficiencia empezará a disminuir, y al realizar este estudio cada 5% no se presenta las curvas que ocuparían la apertura antes mencionada.

3.1.4 Planos

Empleando a cabalidad las normas y códigos de dibujo mecánico, se realizó los pertinentes planos de cada uno de los rodetes. En estos consta sus respectivas cotas, acabados superficiales, escala y tolerancias específicas.

Plano rodete reducido 5%

ANEXO I

Plano rodete reducido 10%

ANEXO I

Plano rodete reducido 15%

ANEXO I

Plano rodete reducido 20%

ANEXO I

3.2 Conclusiones

Se desarrolló una metodología de reducción del diámetro de un rodete, lo que permitió evidenciar las ventajas y desventajas para cada uno de los porcentajes seleccionados.

El material seleccionado para el presente estudio fue la fundición gris, debido a las ventajas que posee sobre los otros materiales, y que permite el cumplimiento de las limitaciones del presente estudio.

La influencia de la selección del material no posee grandes repercusiones en el incremento de la eficiencia de una bomba turbina, por lo que se dio mayor enfoque a la técnica de reducción del diámetro y no a la selección de materiales.

En base al estudio realizado se indica los rangos de mejora de la eficiencia para diferentes medidas de reducción, y también el límite superior en el cual se vuelve perjudicial realizar las reducciones del diámetro.

Mediante la creación de los modelos 3D para la reducción porcentual del diámetro se constata como la disminución de la longitud de los álabes puede beneficiar al comportamiento característico de una bomba turbina, y su eficiencia siempre y cuando el valor de reducción no supere el 10%.

La reducción excesiva del diámetro eterno del rodete que supere el 10% resulta ser contraproducente debido a que existe una gran disminución de la longitud de los álabes, lo que genera una disminución de la presión generada en el interior de la voluta y como resultado también produce una disminución considerable en la eficiencia de la bomba turbina.

3.3 Recomendaciones

Una vez finalizado el presente estudio se considera necesario realizar un rediseño del rodete, modificando los ángulos de ataque de los álabes, y el número de álabes con la finalidad de incrementar la eficiencia de la bomba turbina.

Realizar un análisis de optimización híbrido, en el que se empleará una reducción de diámetro externo y un redondeo de los álabes, para así verificar el comportamiento de la bomba turbina y analizar su influencia en la eficiencia.

Finalmente, se propone realizar un análisis de influencia de la variación de velocidad de operación de la bomba turbina, y comparar empleando varios rodetes para determinar la combinación óptima que potencie el desempeño y la eficiencia de esta máquina.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

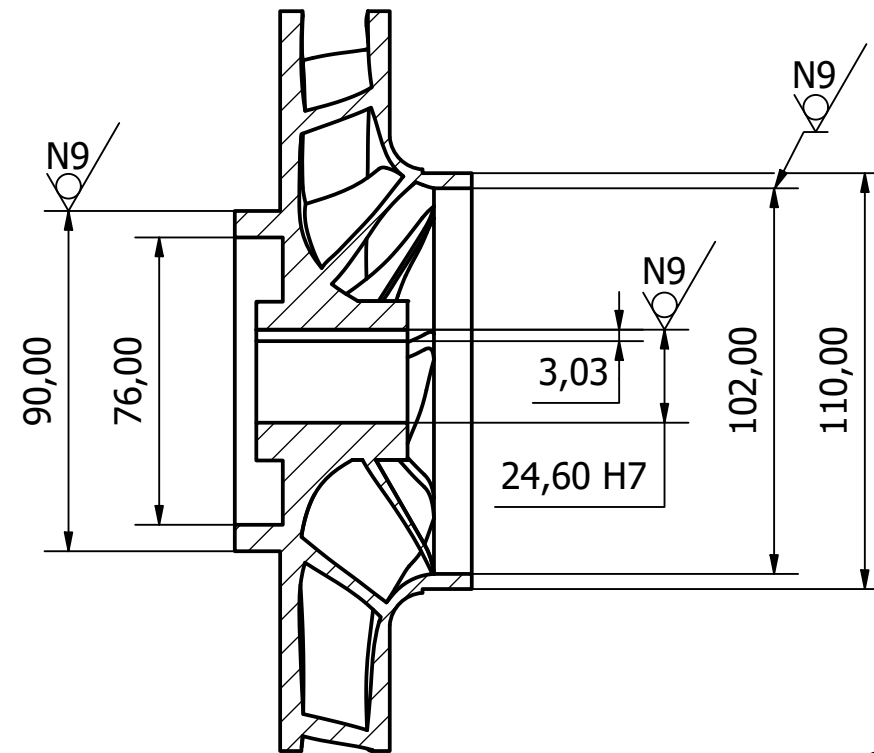
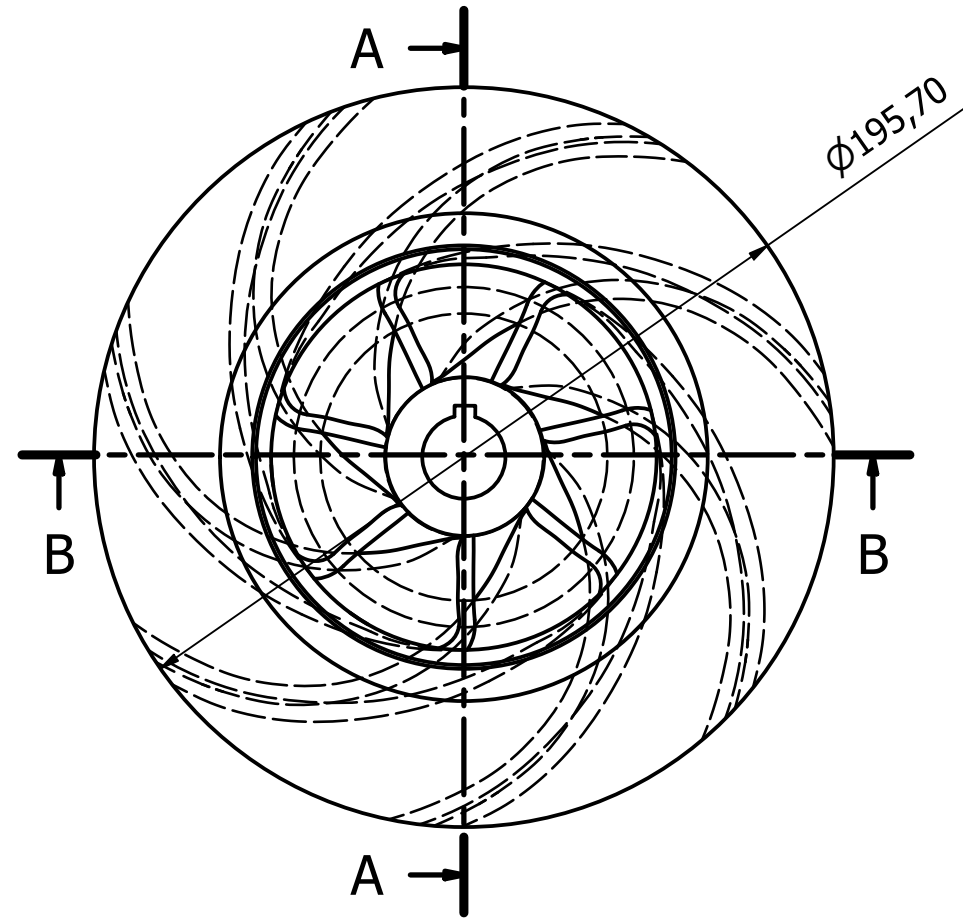
- [1] N. Caizaluisa, «ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA “OBTENCION MODELO GEOMETRICO Y PLANOS” TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO», ago. 2022. Accedido: 19 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/23174>
- [2] M. Polák, «Innovation of pump as turbine according to calculation model for francis turbine design», *Energies (Basel)*, vol. 14, n.º 9, may 2021, doi: 10.3390/en14092698.
- [3] S. v. Jain, A. Swarnkar, K. H. Motwani, y R. N. Patel, «Effects of impeller diameter and rotational speed on performance of pump running in turbine mode», *Energy Convers Manag*, vol. 89, pp. 808-824, ene. 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2014.10.036.
- [4] I. De, M. De, y L. Fluidos, «BOMBAS VOLUMÉTRICAS», 2009.
- [5] F. Cortés y S. Agradecimientos, «Selección de equipo de bombeo para un sistema de suministro de agua».
- [6] «Bomba hidráulica».
- [7] Inducom Ecuador, «Te explicamos los tipos de impulsores o rodetes, según el líquido a bombear», 11 de mayo de 2022. <https://inducom-ec.com/te-explicamos-los-tipos-de-impulsores-o-rodetes-segun-el-liquido-a-bombear/> (accedido 19 de febrero de 2023).
- [8] E. Profesor, C. Marcelo, y P. Gonzalez, «UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL MECANICA FACTIBILIDAD TECNICA DE LA UTILIZACION DE UNA BOMBA COMO TURBINA HIDRAULICA», 2010.
- [9] José Luis Doménech Penella, «CURSO DE INVENTOR BÁSICO», 2015.
- [10] FreeCAD Documentation, «Main Page», 20 de febrero de 2023. https://wiki.freecadweb.org/Main_Page (accedido 19 de febrero de 2023).
- [11] S. Shukla, A. K. Roy, y K. Kumar, «Material Selection for Blades of Mixed Flow Pump Impeller Using ANSYS», en *Materials Today: Proceedings*, 2015, vol. 2, n.º 4-5, pp. 2022-2029. doi: 10.1016/j.matpr.2015.07.172.

5 ANEXOS

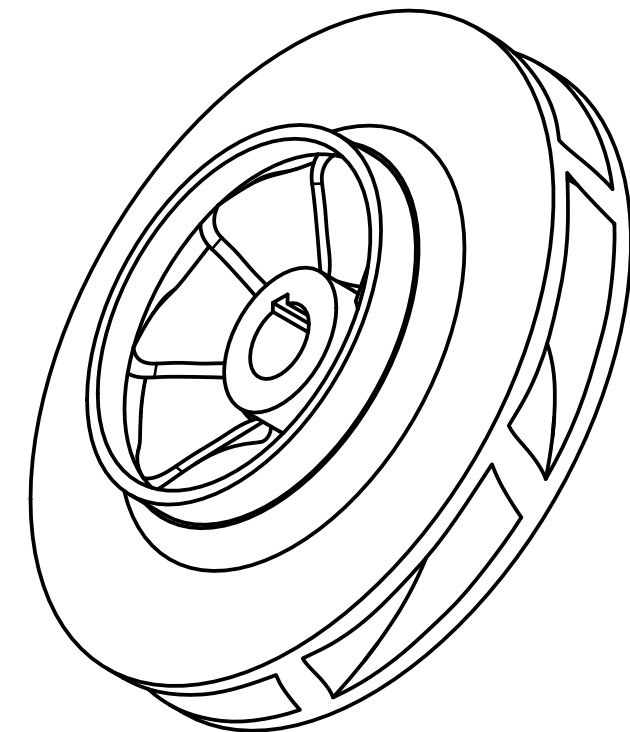
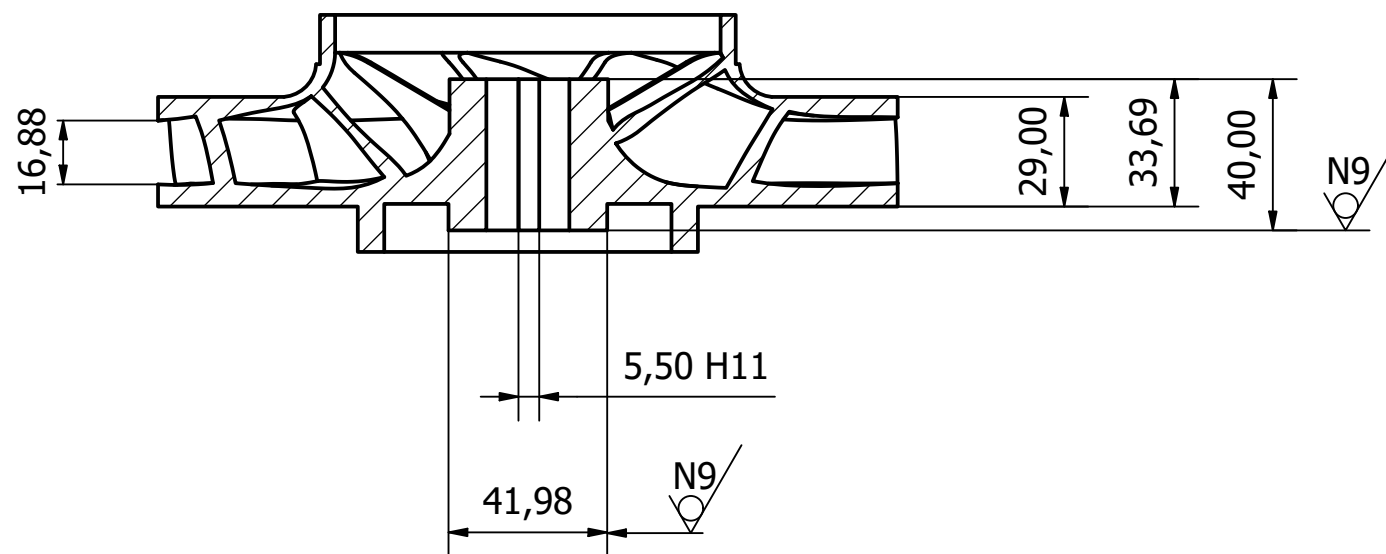
ANEXO I

Se muestran los planos de cada uno de los rodets posteriores a la aplicación de la técnica de reducción de diámetro.

A-A (1 : 2)

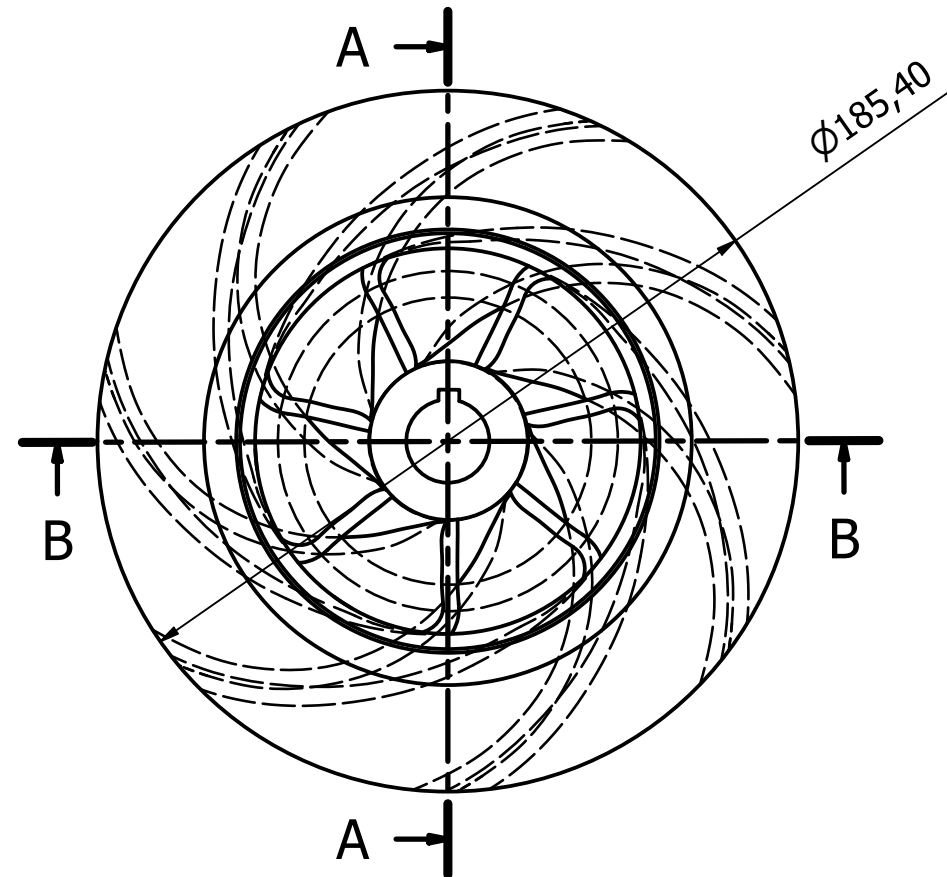
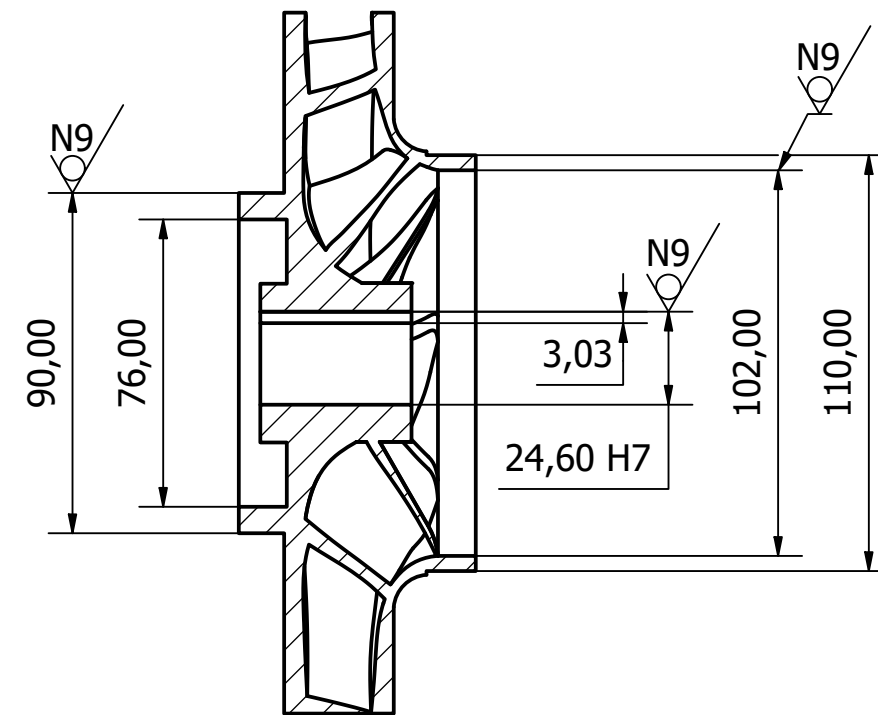


B-B (1 : 2)

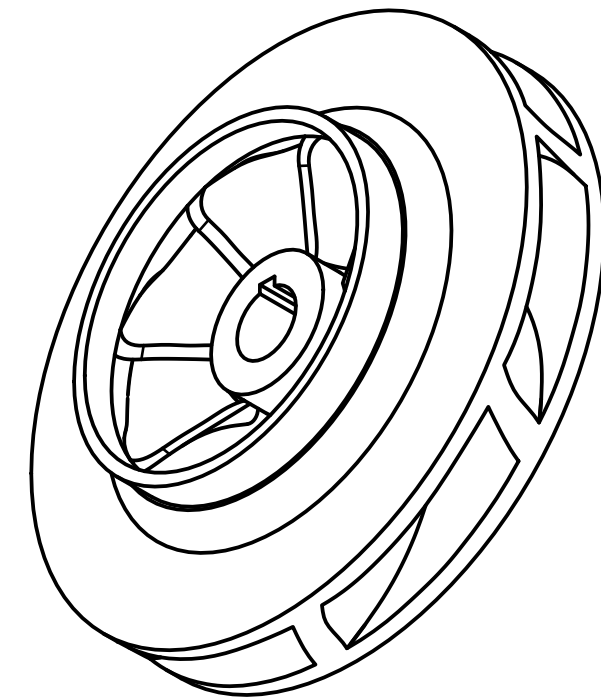
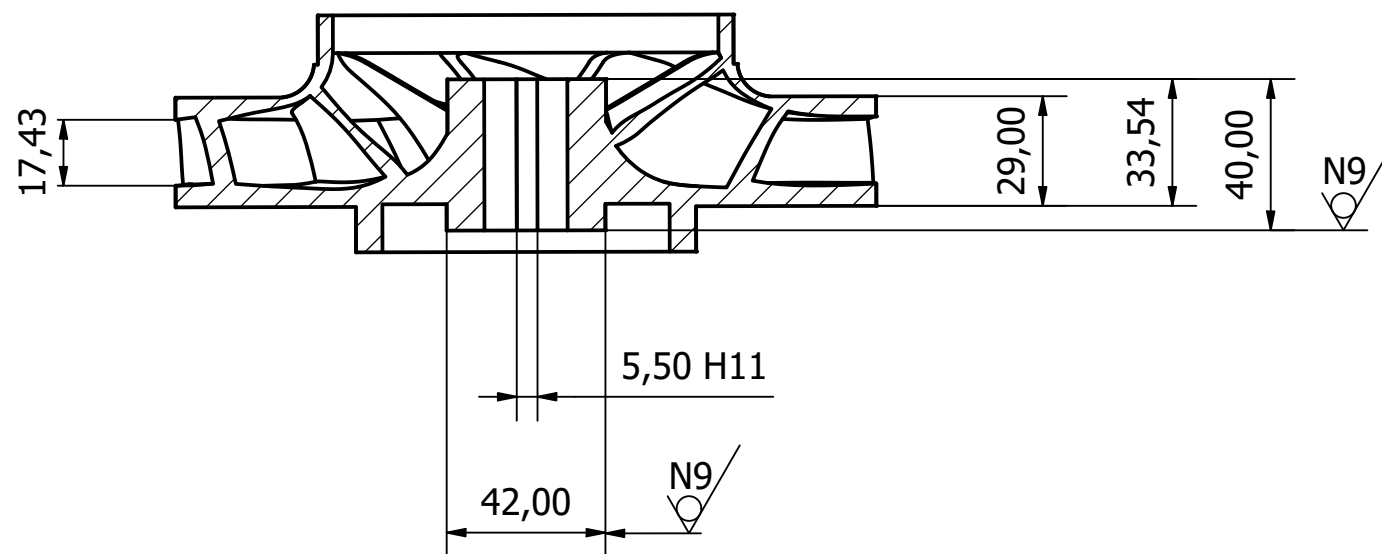


TRAT. TÉRMICO:	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
RECUBRIMIENTO:	Ninguno		DIB:	FERNANDO CHILIG
MATERIAL:	FUNDICIÓN GRIS	TOL.GRAL: ± 0.2	ESCALA:	DIS:
			1:2	FERNANDO CHILIG
			REV:	ING. VICTOR HIDALGO, D.Sc.
RODETE REDUCIDO 5%			NNCCFIM 100.1	
			FECHA 20/02/2023	

A-A (1 : 2)

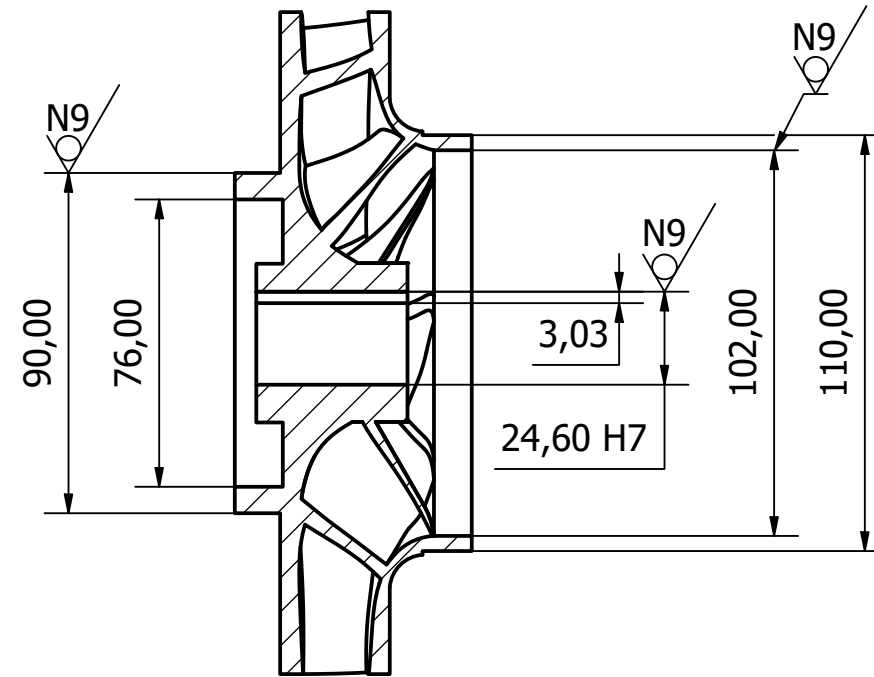
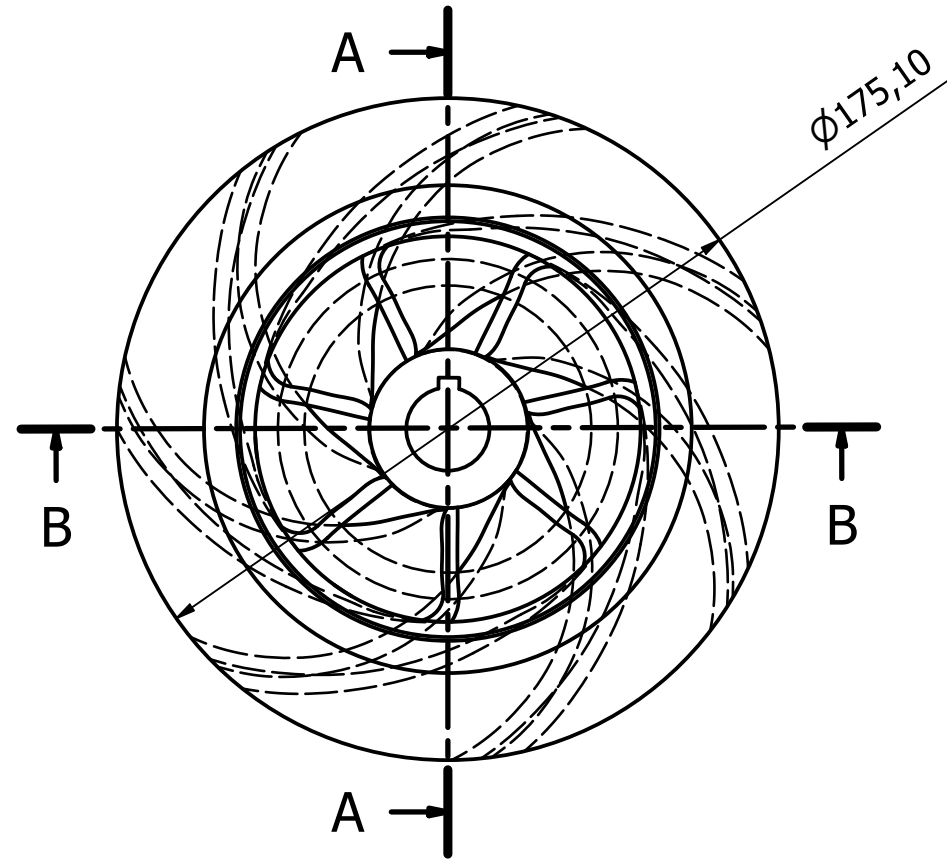


B-B (1 : 2)

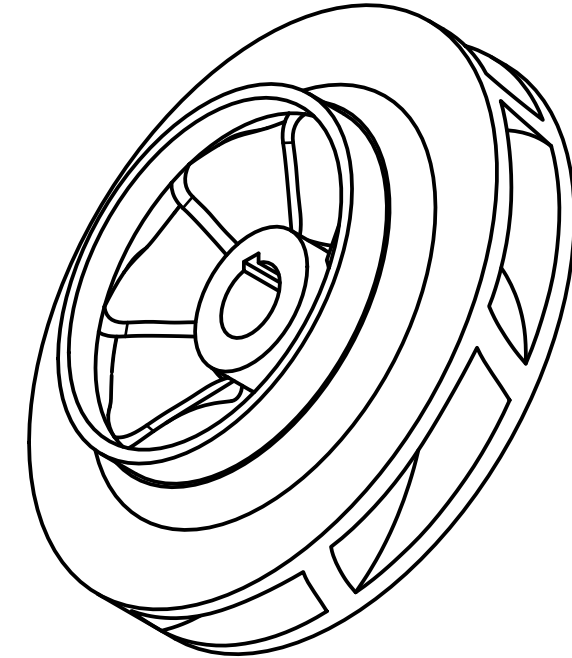
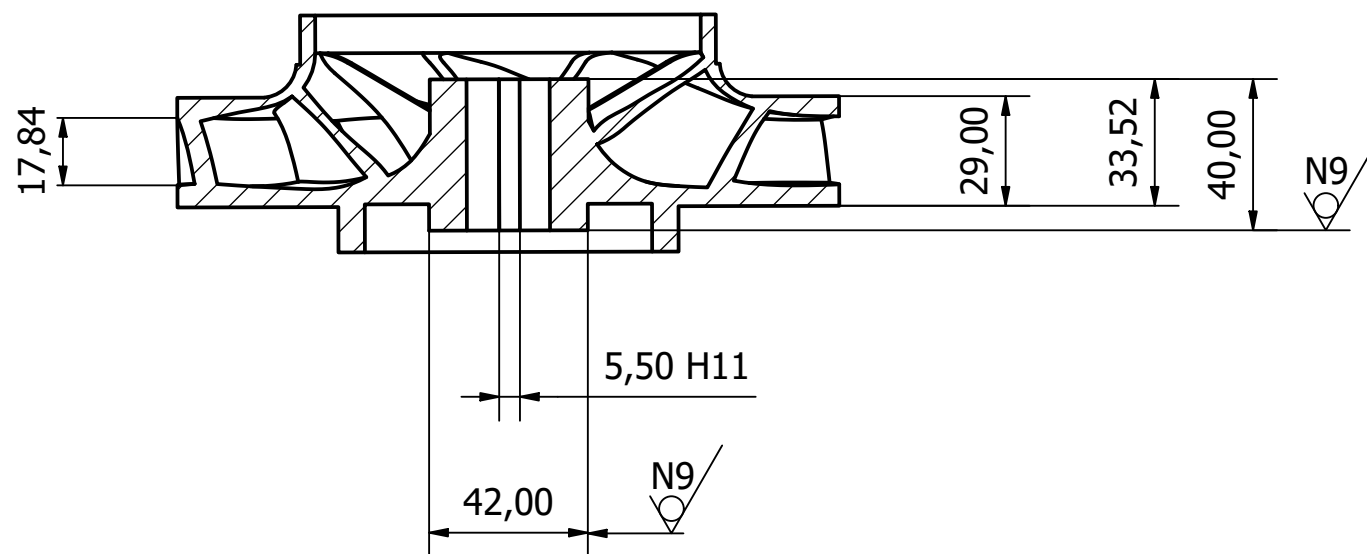


TRAT. TÉRMICO:	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA		
RECUBRIMIENTO:	Ninguno		DIB:	FERNANDO CHILIG	
MATERIAL:	FUNDICIÓN GRIS	TOL.GRAL:	± 0.2	ESCALA:	1:2
				DIS:	FERNANDO CHILIG
				REV:	ING. VICTOR HIDALGO, D.Sc.
RODETE REDUCIDO 10%			NNCCFIM 100.2		FECHA
					20/02/2023

A-A (1 : 2)

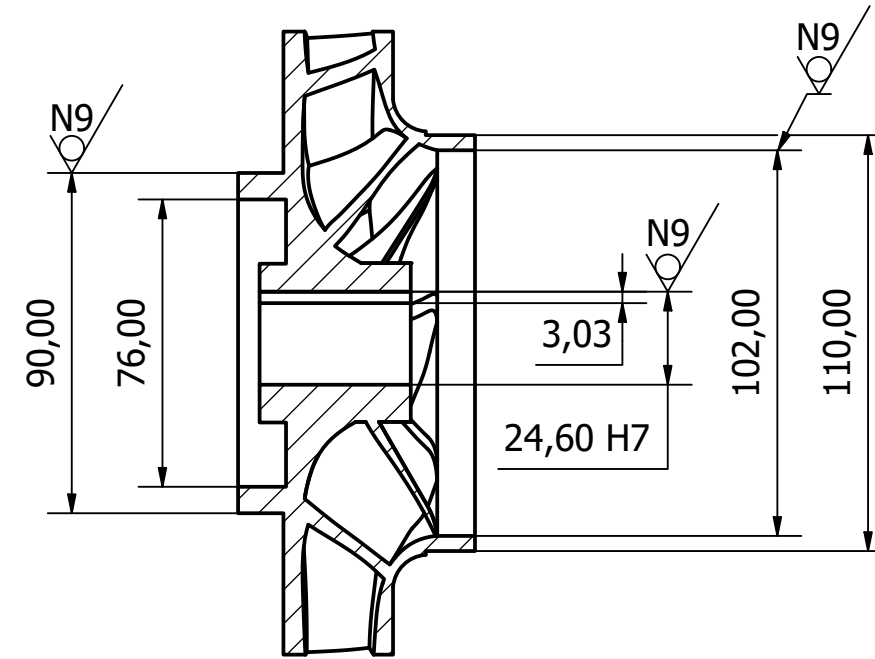
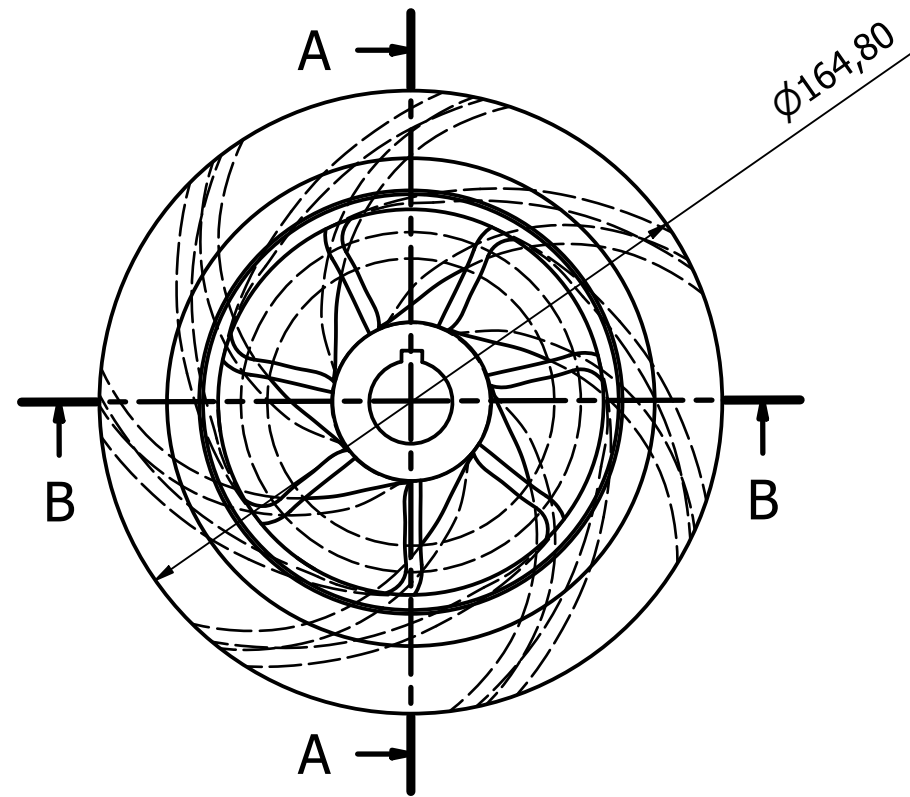


B-B (1 : 2)

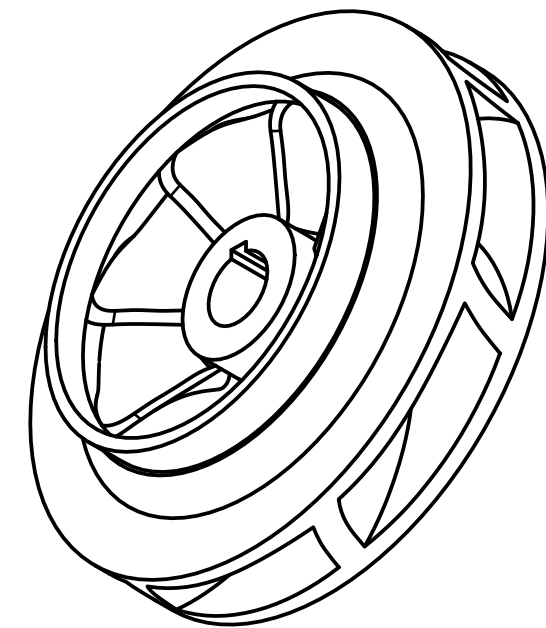
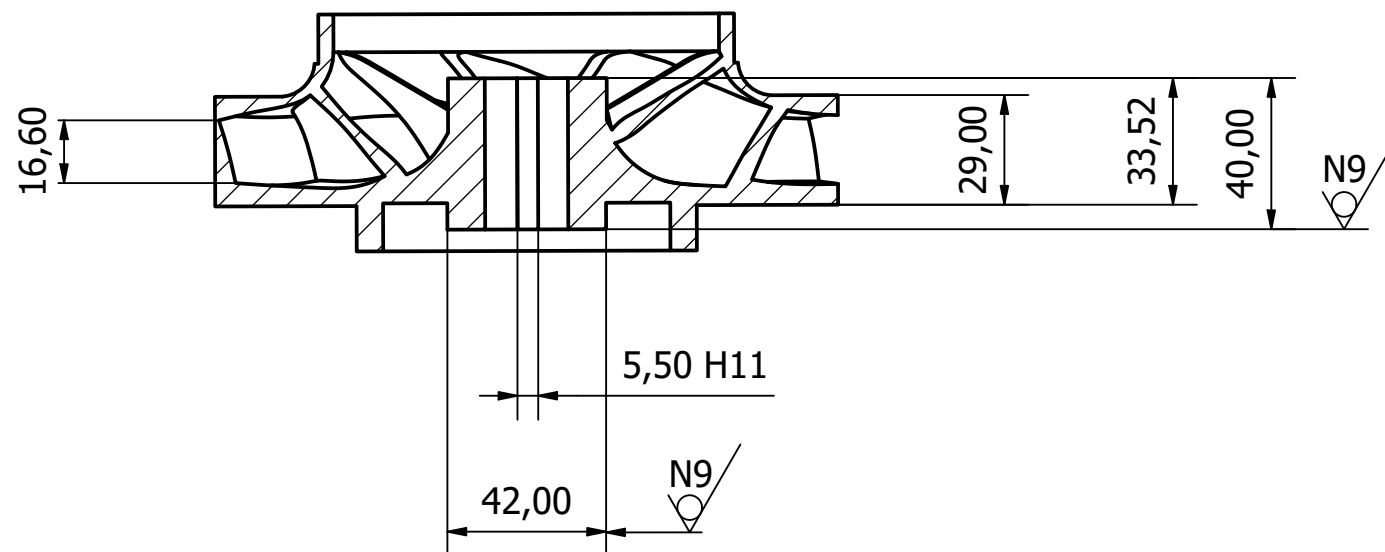


TRAT. TÉRMICO:	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
RECUBRIMIENTO:	Ninguno		DIB:	FERNANDO CHILIG
MATERIAL:	FUNDICIÓN GRIS	TOL.GRAL: ± 0.2	ESCALA:	DIS:
			1:2	FERNANDO CHILIG
			REV:	ING. VICTOR HIDALGO, D.Sc.
RODETE REDUCIDO 15%		NNCCFIM 100.3		FECHA 20/02/2023

A-A (1 : 2)



B-B (1 : 2)



TRAT. TÉRMICO:	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
RECUBRIMIENTO:	Ninguno		DIB:	FERNANDO CHILIG
MATERIAL:	FUNDICIÓN GRIS	TOL.GRAL: ± 0.2	ESCALA:	1:2
			DIS:	FERNANDO CHILIG
			REV:	ING. VICTOR HIDALGO, D.Sc.
RODETE REDUCIDO 20%		NNCCFIM 100.4		FECHA 20/02/2023